

**Method for designing a control unit for a master/slave vehicle steering system, uses bidirectional control with its dynamic ratio as equivalent as possible to that of a preset reference system.**

**Publication number:** DE10216247

**Publication date:** 2003-11-06

**Inventor:** ODENTHAL DIRK (DE); BUENTE TILMANN (DE);  
KOEPE RALF (DE)

**Applicant:** DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT (DE)

**Classification:**

- international: **B62D5/04; B62D6/00; G05B13/04; G05B17/02;  
G05B19/042; B62D5/04; B62D6/00; G05B13/04;  
G05B17/00; G05B19/04; (IPC1-7): G05B13/04;  
B62D6/00; G05B17/02**

- european: **G05B19/042; B62D5/00B; B62D6/00H; G05B13/04B;  
G05B17/02**

**Application number:** DE20021016247 20020412

**Priority number(s):** DE20021016247 20020412

**Report a data error here**

**Abstract of DE10216247**

A device includes a linear manual steering part (100), a steering operation device/steering wheel (102), a steering rack (110a), a track rod (110b) and a non-linear support part (200). A mathematical model is set up in advance for the dynamic behavior of a reference system. Using this model and feedback signals set in advance determines the structure and parameters of a control unit. Independent claims are also included for the following: (a) A bidirectional control unit for a master/slave system; (b) and for a steer-by-wire system with a kinesthetic coupling between a steering operational device for controlling steering behavior through a user with sensors and effective forces/torque regarding angle.

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

①2 Offenlegungsschrift  
①0 DE 102 16 247 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
G 05 B 13/04  
G 05 B 17/02  
B 62 D 6/00

②1 Aktenzeichen: 102 16 247.6  
②2 Anmeldetag: 12. 4. 2002  
④3 Offenlegungstag: 6. 11. 2003

DE 102 16 247 A 1

⑦1 Anmelder:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
51147 Köln, DE  
  
⑦4 Vertreter:  
Mitscherlich & Partner, Patent- und Rechtsanwälte,  
80331 München

⑦2 Erfinder:  
Odenthal, Dirk, Dipl.-Ing., 51107 Köln, DE; Bunte,  
Tilman, Dr.-Ing., 51107 Köln, DE; Köppe, Ralf,  
Dr.sc.techn., 51107 Köln, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 199 12 169 A1  
US 58 28 197 A  
US 61 76 341 B1

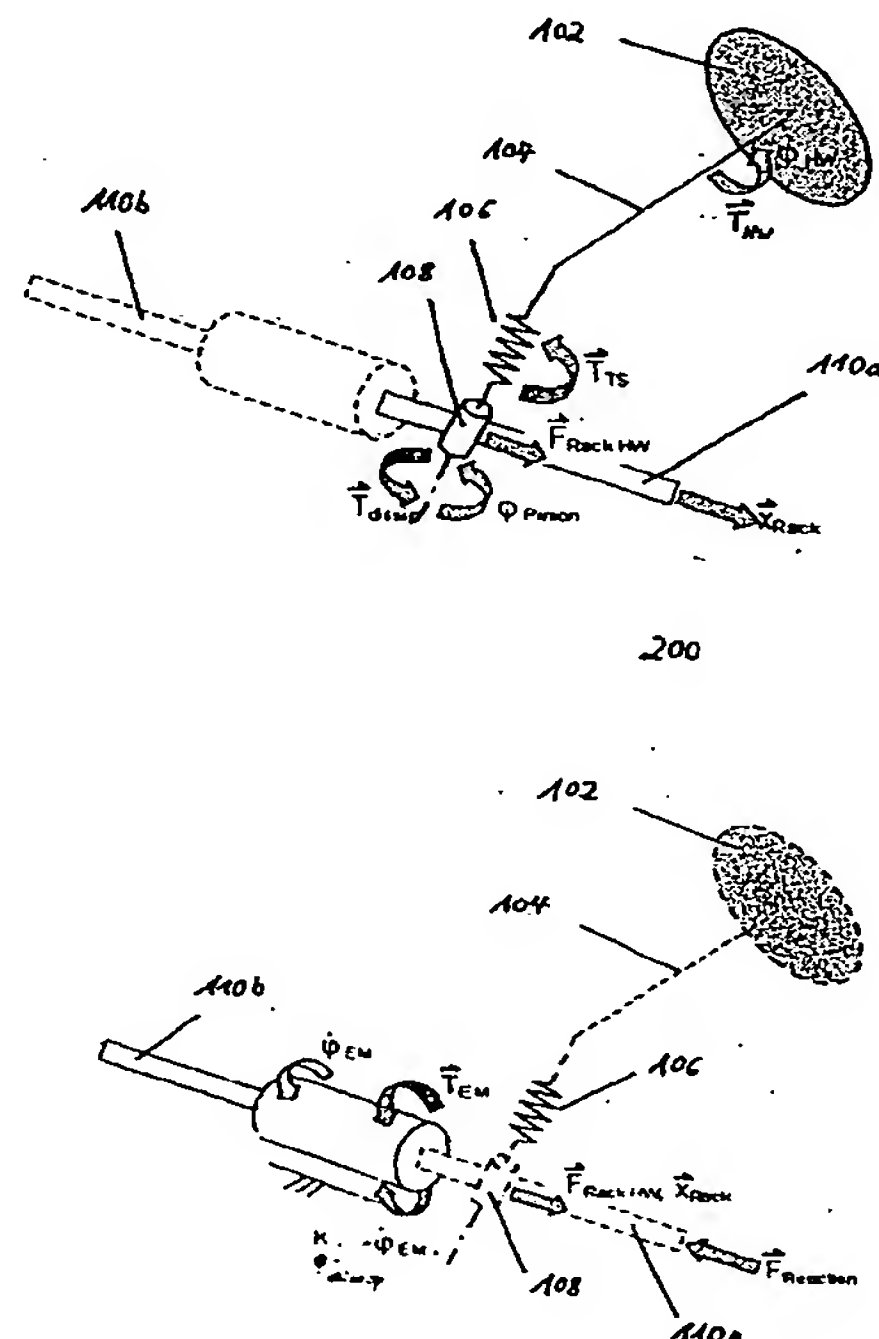
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Regelung von Systemen mit kinästhetischer Kopplung

⑤7 Die Erfindung bezieht sich allgemein auf die Umsetzung von Reglerstrukturen für Master/Slave-Anordnungen mit Kraftrückkopplung (engl.: "Force Feedback"), insbesondere auf die Anwendung dieses Prinzips im Bereich von Steer-by-Wire(SbW)-Lenkssystemen (804) in der Kraftfahrzeugindustrie.

In diesem Zusammenhang ist eine Vorrichtung zur Übertragung des Lenkgefühls konventioneller mechanischer, elektromechanischer bzw. hydraulischer Lenk- und Lenkunterstützungssysteme für Land-, Wasser-, Luft- und Raumfahrzeuge aller Art (806) auf ein mechatronisches Lenksystem (804) mit kinästhetischer Kopplung zwischen mindestens einem Bediengerät (804a) zur Steuerung des Lenkwinkels durch den Benutzer, bestehend aus Sensoren zur Aufnahme der auf das Bediengerät (804a) wirkenden Kräfte und Drehmomente sowie Aktuatoren zur Veränderung dieser Parameter und mindestens einem ausführenden Gerät (804c) zur Lenkung des Fahrzeugs (806) abhängig von der durch das Bediengerät (804a) vorgegebenen Steuerung, bestehend aus Sensoren zur Erfassung der aktuellen Position und Orientierung des Fahrzeugs (806) sowie zur Aufnahme der auf die Komponenten des ausführenden Geräts (804c) wirkenden Kräfte und Drehmomente sowie Aktuatoren zur Veränderung dieser Parameter vorgesehen. Ferner ist ein bidirektionales Regelungssystem (804b) zur Rückführung gemessener Positionen, Orientierungen, Kräfte und/oder Drehmomente vom Bediengerät (804a) zum ausführenden Gerät (804c) und umgekehrt und ein Datenbus (808) zum ...



DE 102 16 247 A 1

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich allgemein auf ein Verfahren zur systematischen Reglerauslegung für Master/Slave-Anordnungen mit Krafrückkopplung (engl.: "Force Feedback"), insbesondere auf die Anwendung dieses Prinzips im Bereich von Steer-by-Wire(SbW)-Lenksystemen in der Kraftfahrzeugindustrie.

**[0002]** Systeme mit kinästhetischer Kopplung (engl.: "Master/Slave"-Systeme), auch krafrückkoppelnde Systeme genannt, ermöglichen die Kopplung eines Bediengeräts (dem Eingabegerät oder Master) mit einem ausführenden Gerät (Slave). Diese Kopplung ist dabei als regelungstechnische Kopplung ausgeführt, so dass über diese, wie z. B. bei einer mechanischen Verbindung, Energie zwischen den Teilsystemen Bediener und Umgebung über das Master/Slave-System ausgetauscht werden kann. Um einen geregelten Energieaustausch zu ermöglichen, sind die Systemkomponenten (Master und Slave) mit einem bidirektionalen Regelkreis gekoppelt, wobei zur Übertragung der zwischen den beiden Teilsystemen (Bediener-Master und Slave-Umgebung) ausgetauschten Signale Technologien der Informationstechnik zum Einsatz kommen (siehe auch Fig. 9 und 10). In diesem Zusammenhang kann zum Beispiel gefordert werden, dass die dynamischen Eigenschaften der Kopplung zwischen Bediener und Umgebung dem eines Referenzsystems entsprechen. Hierzu bedarf es einer systematischen Vorgehensweise bei der Auslegung des bidirektionalen Regelkreises, welche ebenfalls Gegenstand der Erfindung ist.

**[0003]** Systeme mit kinästhetischer Kopplung haben ihren Ursprung in der Handhabungstechnik für radioaktives Material. Dabei konnte ein Bediener mit einem Manipulatorarm-Bediengerät (Master) von außen in einer geschlossenen Zelle einen weiteren Manipulator (Slave), bedienen. Die Kopplung erfolgte zunächst mechanisch. Ab Mitte der fünfziger Jahre wurde die mechanische durch eine elektrische Kopplung unter Verwendung von Servomotoren im Bedien- und ausführenden Gerät ersetzt. Ein Überblick über die Entwicklungen dieser sogenannten Teleoperatoren wird zum Beispiel in T. B. Sheridan, "Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control" (The MIT Press, 1992) gegeben.

**[0004]** Neue Anwendungen dieser Technologie sind unter dem Stichwort "Telepräsenz" unter anderem in den Bereichen der Raumfahrt-, Luftfahrt-, Medizin-, Automobil- und Mikrosystemtechnik zu finden. Telepräsenz bezieht sich dabei auf die Überwindung der folgenden Barrieren in den unterschiedlichsten Bereichen:

- Distanz (z. B. bei der Steuerung von Satellitensystemen im Weltraum von der Erde aus oder in der Telemedizin, z. B. Telediagnostik und -therapie),
- Materie (z. B. Trennung der Fahrerkabine und des Fahrwerks von Kraftfahrzeugen durch Ersetzen der mechanischen Lenksäule durch elektrische Signale und Aktuatoren bei Lenksystemen in der Automobiltechnik, oder in der minimal invasiven Chirurgie)
- Skalierung (z. B. im Bereich der Mikromontage, der Chirurgie oder bei der Handhabung von großen Objekten mit Hilfe sogenannter Extendersysteme) oder
- beliebige mögliche Kombinationen hiervon, wie in dem Artikel "Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems" (Workshop Proceedings, Technical University of Munich, Institute of Automatic Control Engineering, March 29–30, 2001, ISBN 3-00-007586-0) von G. Färber und J. Hoogen beschrieben.

**[0005]** In der Luftfahrt- und Automobiltechnik ermöglichen sogenannte "X-by-Wire"-Systeme (darunter Fly-by-Wire-, Drive-by-Wire- und Steer-by-Wire-Systeme) die Mechatronisierung von Flugzeugen und Fahrzeugen. Dabei werden konventionelle mechanische oder hydraulische Systeme (wie z. B. Lenkung, Bremse und Gaspedal) schrittweise durch verteilte elektromechanisch ansteuerbare Systeme ersetzt, welche über echtzeitfähige Datenbusse – z. B. Controller Area Network (CAN)-Busse in Verbindung mit Time-Triggered Protocol(TTP)-Netzwerken – gekoppelt werden. Dies ermöglicht eine schrittweise Einführung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion zur Erhöhung von Fahrsicherheit und -komfort bei einer potenziellen Erhöhung des Autonomiegrades, wie beschrieben in E. A. Bretz, "By-Wire Cars: Turn the Corner" (IEEE Spectrum, April 2001).

**[0006]** Ein System mit kinästhetischer Kopplung kann als elektrisches Vierpol-Netz modelliert werden. Analog zu den zeitabhängigen Variablen eines elektrischen Vierpols, dem Spannungsvektor  $u(t)$  und dem Stromvektor  $i(t)$ , sind die Variablen des mechanischen Systems der Kraftvektor  $\vec{F}(t)$  und der Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}(t)$ . Die Eingangsseite des Vierpols ist mit dem Bediener verbunden, die Ausgangsseite mit der Umgebung des ausführenden Geräts. Der Bediener, das Bedien- und ausführende System und die Umgebung werden als lineares oder als nichtlineares Modell mit konzentrierten Parametern angenommen. Je nach Wahl der unabhängigen Variablen wird ein solcher Vierpol dabei als Impedanzmatrix  $\underline{Z}$ , Admittanzmatrix  $\underline{A}$  oder als Hybridmatrix  $\underline{H}$  modelliert, vgl. B. Hannaford, "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback" (IEEE Trans. on Robotics and Automation, S. 426–434, 1989).

**[0007]** Durch Kraft- und/oder bidirektionale Positions-, Geschwindigkeits- und ggf. Beschleunigungsrückkopplung können drei verschiedene Qualitäten der Übertragung verwirklicht werden, die in der einschlägigen Literatur auch als "Ideal Responses" bezeichnet werden, wie beispielsweise in Y. Yokokohji und I. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling" (in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1992) und "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling – Formulation and Experiment" (IEEE Trans. on Robotics and Automation, S. 605–620, 1994):

- a) Gleichheit der Positionen für Master und Slave,
- b) Gleichheit der Kräfte für Master und Slave,
- c) Gleichheit von Positionen und Kräften für Master und Slave.

**[0008]** Die Gleichheit von Positionen und Kräften wird in der Robotik auch als "Transparenz" bezeichnet. Ideale Transparenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Bediener des Eingabegerätes (des Master-Roboters) alle haptischen Informationen so wahrnimmt, als ob er anstelle des ausführenden Gerätes (also anstelle des Slave-Roboters) agieren würde. Um die drei verschiedenen Qualitäten der Übertragung a)–c) zu realisieren, geht man von folgenden



Rückführungen aus:

- a) bidirektionale Positionsrückführung,
- b) bidirektionale Krafrückführung und
- c) bidirektionale Positions- und Krafrückführung.

5

**[0009]** Besteht zwischen den Positionen bzw. Kräften an Master und Slave ein dynamischer Zusammenhang, z. B. aufgrund der beteiligten Trägheiten, Elastizitäten etc. von Master und Slave-Roboter, so spricht man von einem Master/Slave-System mit dazwischenliegender Dynamik (engl.: "Intervening Dynamics"). Aufgrund dessen ist es in der Praxis schwierig, wenn nicht gar unmöglich, eine perfekte dynamische Transparenz zu verwirklichen. Sowohl konventionelle als auch SbW-Lenksysteme können als Master/Slave-Systeme mit einem Freiheitsgrad und dazwischenliegender Dynamik interpretiert werden. In diesem Zusammenhang würde Transparenz bedeuten, dass der Fahrer jede auch noch so geringe Straßenunebenheit am Lenkrad spürt. Dies ist nicht erwünscht, weswegen eine Tiefpassfilterung der Signale, wie es bei der konventionellen Lenkung mechanisch realisiert ist, durchaus angestrebt wird. Ziel ist hier nicht mehr die Gleichheit von Positionen und/oder Kräften sondern die Realisierung einer bestimmten dazwischenliegenden Dynamik. Auch besteht ggf. die Notwendigkeit, Kräfte und Positionen unterschiedlich zu skalieren. Der genaue statische und dynamische Zusammenhang zwischen den Kräften und Positionen an Lenkrad und Spurstange bestimmen maßgeblich das Lenkgefühl, welches vom Automobilhersteller bzw. Zulieferer von Lenkungen mit besonderer Aufmerksamkeit abgestimmt wird. Für die Realisierung eines SbW-Lenksystems ist es daher von großer Wichtigkeit, die dazwischenliegende Dynamik in geeigneter Weise gestalten zu können.

10

15

20

**[0010]** Die Skalierung von Kräften und Positionen ist beispielsweise auch bei der minimal invasiven Chirurgie für die Realisierung hochgenauer Eingriffe erforderlich.

**[0011]** Da sich ein Ausführungsbeispiel der zugrunde liegenden Erfindung auf die Verwendung von Steer-by-Wire(SbW)-Lenksystemen im Kraftfahrzeugbereich bezieht, soll im Folgenden kurz auf die zentralen Aspekte und Konzepte von SbW-Lenksystemen eingegangen werden.

25

– In der Fahrzeugindustrie zeichnet sich in den nächsten Jahren die Einführung von Steer-by-Wire-Lenksystemen ab, wobei der gesamte Lenkwinkel von einem bzw. mehreren Lenkmotoren gestellt wird. Die bis dato vom Gesetzgeber vorgeschriebene mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Vorderrädern wird unterbrochen und durch ein elektrisches Signal ersetzt.

30

– Für die regelungstechnische Realisierung von Steer-by-Wire-Lenksystemen wird neben dem/den Lenkaktuator(en) eine zweite Stelleinrichtung, ein kraftreflektierendes Lenkrad oder eine Lenkbetätigungseinrichtung (ein sogenannter "Sidestick") benötigt, über die zum einen der Fahrer seine Lenkeingabe tätigt und die zum anderen dem Fahrer durch haptische Rückkopplung das notwendige Lenkgefühl vermittelt.

35

**[0012]** Ziel des SbW-Reglerentwurfs ist es zunächst, die dynamischen und statischen Eigenschaften einer konventionellen Lenkung auf das SbW-System zu übertragen. Dies bedeutet, dass die dazwischenliegende Dynamik, d. h. die Dynamik zwischen Lenkrad und Vorderrad, in beiden Richtungen in Bezug auf Positionen und Kräfte der konventionellen (Servo-)Lenkung entsprechen soll. Demzufolge sind die beiden grundlegenden Anforderungen an den regelungstechnischen Entwurf eines SbW-Systems

40

– die Äquivalenz zwischen SbW-System und dem Referenzsystem und  
die robuste Stabilität des SbW-Gesamtsystems, welches das SbW-Lenksystem, die Fahrerimpedanz und die Fahrzeugimpedanz umfasst. Aufgrund variierender oder unsicherer Betriebsbedingungen (z. B. Fahrgeschwindigkeit, Beladung, Straßenzustand) und der variierenden Biomechanik des Fahrers (z. B. Fahrer hält Lenkrad verschieden stark fest) müssen Fahrer und Fahrzeugimpedanz für den regelungstechnischen Entwurf innerhalb gewisser Grenzen als unsicher angenommen werden.

45

**[0013]** Gedanklich lässt sich eine Servo-Lenkung in ein manuellen (in erster Näherung) linearen Lenkanteil und einen nichtlinearen Unterstützungsanteil aufteilen. Somit kann die Dynamik der Servo-Lenkung beschrieben werden durch

50

$$\begin{bmatrix} \varphi_{HW} \\ x_{Rack} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{HW} \\ F_{Reaction} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ P_{23} \end{bmatrix} \cdot F_{a,PS}, \quad (1)$$

55

wobei

$\varphi_{HW}$  [°] den Lenkradwinkel,

$F_{a,PS}$  [N] den Sollwert der Lenkunterstützungskraft,

$F_{Reaction}$  [N] die Summe der Kräfte, die die Spurhebel auf die Spurstangen ausheben,

$P_{ij}$  lineare Übertragungsfunktionen,

60

$T_{HW}$  [Nm] das Lenkradmoment und

$x_{Rack}$  [m] die Spurstangenposition bezeichnet.

**[0014]** Der Sollwert der Unterstützungskraft

$$F_{a,PS} = F_{a,PS}(\varphi_{HW}, T_{TS}, v) \quad (2)$$

65

ist je nachdem entweder der Ausgang des Steuergerätes der Servo-Lenkung, oder er entspricht der nichtlinearen Charakteristik des Steuerventils der Hydraulik. Die Kraft  $F_{a,PS}$  ist eine nichtlineare Funktion, die von der Lenkradwinkelge-

schwindigkeit  $\phi_{HW}$ , vom Lenksäulenmoment  $T_{TS}$  (z. B. an einem Drehstab gemessen) und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  abhängt.

**[0015]** In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten Aspekte und Konzepte konventioneller Systeme mit kinästhetischer Kopplung (engl.: "Master-Slave Force Feedback Systems") und konventioneller Lenkungen mit elektromechanischer oder hydraulischer Lenkkraftunterstützung nach dem Stand der Technik zusammenfassend dargestellt werden.

**[0016]** Bei einer regelungstechnischen Umsetzung von Master/Slave-Systemen mit Krafrückkopplung (engl.: "Force Feedback") wird im Allgemeinen von einer festen Reglerstruktur ausgegangen. Die Reglerparameter werden so eingestellt, dass das Gesamtsystem Bediener-Master-Regler-Slave-Umgebung robust stabil ist (bei unsicherer bzw. variierender Bediener- und Umgebungsimpedanz) und dass die Transparenz möglichst gut ist. Bei Master/Slave Force Feedback-Systemen wird überwiegend von linearen Reglerstrukturen ausgegangen.

**[0017]** Lenkungen mit hydraulischer Lenkkraftunterstützung (HPS) sind Stand der Technik und bereits in einem Großteil der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge eingebaut. Daneben existieren neuartige Lenkungen mit elektromechanischer Lenkkraftunterstützung (EPS), vgl. P. Dominke und G. Ruck, "Electric Power Steering – the First Step on the Way to "Steer By Wire"" (SAE, Nr. 1999-01-0401, 1999). Hierbei wird unterschieden zwischen "Column-Type", "Pinion-Type", "Double-Pinion-Type" und "Rack-Type" EPS.

**[0018]** HPS- und EPS-Lenkungen stellen den Stand der Technik dar hinsichtlich des dynamischen Verhaltens und des Lenkgefühls. EPS-Systeme und Zusatzlenksysteme dienen der Technologievorbereitung für SbW, z. B. hinsichtlich Aktuatorik, Sensorik, CAN-Bus- und Bordnetzanbindung. SbW-Lenksysteme und der Einsatz von Lenk- und "Force Feedback"-Aktuatoren werden in der einschlägigen Literatur ausführlich beschrieben.

**[0019]** Die Anwendung von Master/Slave-Regelungsstrategien auf SbW-Lenksysteme wird insbesondere in der unten zusammenfassend dargestellten US-Patentschrift 6,176,341 B1 sowie in den drei Artikeln "Human-Friendly Control Design for Drive-by-Wire-Steering Vehicles" (in Proc. 3rd IFAC Workshop on Advances in Automotive Control, Karlsruhe, 2001) von C. Canudas-De-Wit und P. Billot, "Control Design for an Electro Power Steering System. Part I: The Reference Model" (in Proc. European Control Conference, Porto, Portugal, S. 3611 bis 3616, 2001) von C. Canudas-De-Wit, S. Guegan und A. Richard und "Control Design for an Electro Power Steering System. Part II: The Control Design" (in Proc. European Control Conference, Porto, Portugal, S. 3617 bis 3623, 2001) von C. Canudas-De-Wit, S. Guegan und A. Richard beschrieben.

**[0020]** Im Folgenden sollen einige Druckschriften erwähnt und zusammenfassend beschrieben werden, in denen Lenksysteme nach dem Stand der Technik offenbart werden, die von technischer Relevanz für den Lösungsansatz der zugrunde liegenden Erfindung sind.

**[0021]** Das in der Offenlegungsschrift DE 100 40 870 A1 beschriebene Lenksystem für ein Kraftfahrzeug weist ein Lenkgestänge, ein Lenkrad, das mit einem Steuer-Hydraulikmotor verbunden ist, sowie einen Steuer-Hydraulikzylinder, welcher mit dem Steuer-Hydraulikmotor durch einen Steuer-Hydraulikkreis verbunden ist, auf.

**[0022]** Die Offenlegungsschrift DE 100 39 170 A1 bezieht sich auf ein Lenksystem für ein Kraftfahrzeug, das über ein Lenkgestänge und zwei Stelleinheiten verfügt, welche gemeinsam das Lenkgestänge verstellen können, wobei jede Stelleinheit eine Steuerelektronik, einen Stellmotor und einen Positionssensor zur Erfassung der aktuellen Stellung des Stellmotors enthält.

**[0023]** In der Offenlegungsschrift DE 199 12 169 A1 wird ein SbW-Lenksystem für Kraftfahrzeuge beschrieben, welches aus einem elektronisch geregelten elektromotorischen Lenksteller, der am Lenkgetriebe der Vorderachse oder auch an beiden Vorderrädern angebracht ist, einem elektronischen Lenkregler sowie einer Feedback-Aktuatoreinheit besteht.

**[0024]** Außerdem wird in der US-Patentschrift 6,176,341 B1 ein SbW-Lenksystem für ein Kraftfahrzeug offenbart, welches eine Krafrückkopplung von den Rädern des Fahrzeugs zu dem von der Hand des Fahrers zu betätigenden Lenkrad bereitstellt, wodurch der Fahrer in die Lage versetzt wird, den von der Fahrzeug-Impedanz herrührenden Lenkwiderstand in gewohnter Weise zu spüren.

**[0025]** In der US-Patentschrift 6,285,936 B1 wird ein Lenksystem für Kraftfahrzeuge offenbart, das sowohl in einem Normalmodus betätigt werden kann, in dem das zur Steuerung des Fahrzeugs zu bedienende Lenkrad vom Fahrer betätigt wird und die Räder des Fahrzeugs mit einem Steuerungssystem verbunden sind, als auch in einem Ausnahmehodus, wobei Führungsgröße (der Lenkradlenkwinkel) und Regelgröße (die Lenkwinkel der Räder) über ein Regelungs- und Steuerungssystem mit positiver Rückkopplung (Mitkopplung) miteinander verbunden sind.

**[0026]** Darüber hinaus ist in der Offenlegungsschrift DE 100 15 050 A1 von einer Vorrichtung zur Betätigung eines SbW-Lenkantriebes für ein Kraftfahrzeug die Rede, das über zwei über eine Steueranordnung vom Fahrer ansteuerbare Stellmotoren verfügt, die auf ein Stellelement einwirken.

**[0027]** Die in der Offenlegungsschrift DE 199 35 073 A1 beschriebene Erfindung betrifft eine Kraftfahrzeuglenkung mit einer von einer Bedienperson zu betätigenden Handhabungseinrichtung (z. B. einem Lenkrad) und einem hiermit verbundenen Sollwertgeber, mit einer den Sollwertgeber auswertenden elektronischen Steuerung und wenigstens einem elektrischen Stellmotor für einen Radwinkelstellantrieb, der dazu eingerichtet ist, in Abhängigkeit von der elektronischen Steuerung in bekannter Weise Lenkfunktionen bereitzustellen und bei Bedarf autonom und unabhängig von einer Bedienperson einen Lenkvorgang auszuführen.

**[0028]** Die in der Offenlegungsschrift DE 198 34 868 A1 offenbarte Erfindung geht von einem Lenkradsteller für eine SbW-Anwendung in Kraftfahrzeugen aus, die über einen an einer Lenkradwelle angreifenden und diese mit einem Stellmoment beaufschlagenden elektrischen Stellmotor und wenigstens einen den Lenkradwinkel erfassenden ersten Winkelsensor verfügt. Die in der Offenlegungsschrift DE 198 34 870 A1 beschriebene Erfindung bezieht sich auf einen fehler-toleranten elektromechanischen SbW-Lenksteller für Kraftfahrzeuge, der mit einem elektronischen Regel- bzw. Steuerwerk ausgestattet ist. Dieses erzeugt die Lenksignale für einen elektrischen Stellmotor, welcher über ein Getriebe an einem Lenkungsstellelement einer Zahnstangenlenkung angreift.

**[0029]** Ein Verfahren, das dem Fahrer eines Straßenfahrzeuges eine hilfreiche Lenkunterstützung bietet, ist in der deutschen Patentschrift DE 196 50 691 C2 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird eine Giergeschwindigkeit  $r$  [rad/s] um



die Hochachse mittels eines Gierratensensors gemessen, eine Fahrgeschwindigkeit  $v_x$  [m/s] über ABS-Sensoren bestimmt sowie eine Beschleunigung  $a_x$  [m/s<sup>2</sup>] in Fahrtrichtung (also in x-Richtung) mit Hilfe eines Beschleunigungsmessers gemessen.

[0030] In der deutschen Patentschrift DE 42 06 654 C2 wird ein Verfahren zum Lenken eines Straßenfahrzeugs mit Vorder- und Hinterradlenkung beschrieben, bei welchem durch eine integrierende Rückführung eines gemessenen Giergeschwindigkeitssignals auf die Vorderradlenkung die Gierbewegung von der Seitenbewegung der Vorderachse entkoppelt wird, wodurch das Problem der Lenkung in zwei separat zu lösende Teilprobleme aufgeteilt wird, nämlich in eine seitliche Spurführung der Vorderachse durch ein Signal, das ein Fahrer mit dem Lenkrad erzeugt, und eine automatische Regelung der Gierbewegung. 5

[0031] Vergleichbar mit dem in der deutschen Patentschrift DE 42 06 654 C2 offenbarten Verfahren ist auch in der deutschen Patentschrift DE 40 28 320 C2 ist von einem Verfahren zum Lenken eines Straßenfahrzeugs mit Vorder- und Hinterradlenkung die Rede, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass durch eine integrierende Rückführung eines gemessenen Giergeschwindigkeitssignals auf die Vorderradlenkung die Gierbewegung von der Seitenbewegung der Vorderachse entkoppelt wird, wodurch das Problem der Lenkung in zwei separat zu lösende Teilprobleme zerfällt, nämlich in eine seitliche Spurführung der Vorderachse durch ein Signal, das ein Fahrer mit dem Lenkrad erzeugt, sowie in eine automatische Regelung der Gierbewegung. 10 15

[0032] Ein ähnliches Verfahren zum Lenken eines Straßenfahrzeugs mit Vorderradlenkung ist in der deutschen Patentschrift DE 43 07 420 C1 beschrieben.

[0033] In der deutschen Patentschrift DE 199 18 597 C2 wird ein Verfahren zur Reduktion der Kippgefahr von Straßenfahrzeugen beschrieben. 20

[0034] In der Offenlegungsschrift DE 197 50 585 A1 wird ein Aktuator zum Korrigieren eines über das Lenkrad an die Räder einer gelenkten Fahrzeugachse eingegebenen Lenkwinkels offenbart.

#### PROBLEME HERKÖMMLICHER LÖSUNGEN NACH DEM STAND DER TECHNIK 25

[0035] Beim Stand der Technik werden keine Verfahren für die regelungstechnische Auslegung von SbW- bzw. Master/Slave-Systemen angegeben, die einen systematischen Entwurf eines Regelungssystems zur Realisierung einer bestimmten gewünschten kinästhetischen Kopplung ermöglichen. Die Struktur des Reglers muss bei allen bekannten Ansätzen vom Entwurfsingenieur vorgegeben werden. Ein systematisches Verfahren, um das Verhalten eines vorgegebenen Referenzsystems auf ein Master/Slave-System zu übertragen, existiert nicht. Im Speziellen existiert auch kein systematisches Verfahren, um das Lenkgefühl einer konventionellen Lenkung auf ein Steer-by-Wire-System zu übertragen. 30

#### AUFGABE DER VORLIEGENDEN ERFINDUNG

[0036] Ausgehend von dem oben genannten Stand der Technik, widmet sich die vorliegende Erfindung der Aufgabe, ein regelungstechnisches Verfahren bereitzustellen, welches es ermöglicht, in systematischer Weise ein System mit kinästhetischer Kopplung so auszulegen, dass das dynamische Verhalten dem eines vorgegebenen Wunsch- oder Referenzsystems (z. B. dem dynamischen Verhalten einer konventionellen Lenkung) entspricht. 35

[0037] Grundsätzlich kann für das Referenzsystem eine nahezu beliebige Dynamik gewählt werden.

[0038] Eine Vielzahl weitergehender Aspekte müssen beim regelungstechnischen Entwurf eines SbW-Lenkensystems berücksichtigt werden. Zunächst muss gewährleistet werden, dass das SbW-Gesamtsystem robust stabil ist, d. h. stabil bei 40

- variierender bzw. unsicherer biomechanischer Dynamik der Fahrerhand ("Fahrer-Impedanz"). Der Fahrer hält das Lenkrad lose oder fest und kann deswegen als variierende bzw. unsichere Impedanz aufgefasst werden. 45
- unsicherer Dynamik des Fahrzeugs und des Reifen/Fahrbahn-Kontakts (zusammengefasst zur "Fahrzeug-Impedanz"). Die Fahrdynamik und damit die Fahrzeug-Impedanz hängt wesentlich von der Fahrgeschwindigkeit, der Beladung und vom Straßenzustand ab.

[0039] Hieraus und aus der Berücksichtigung der bei der Modellierung vernachlässigten Dynamik sowie aus der Unterdrückung von Störgrößeneinflüssen und Messrauschen ergeben sich die wesentlichen Robustheitsanforderungen für SbW-Lenkensysteme, die neben der Anforderung der Äquivalenz erfüllt werden müssen. 50

[0040] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausführungsbeispiele, die den Gedanken der Erfindung weiterbilden, sind in den abhängigen Patentansprüchen definiert. 55

#### ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER VORLIEGENDEN ERFINDUNG

[0041] Die zugrunde liegende Erfindung offenbart, entsprechend der im vorangehenden Abschnitt definierten Aufgabe, ein effizientes Verfahren zur Umsetzung von Reglerstrukturen für Master/Slave-Anordnungen mit kinästhetischer Kraftrückkopplung (engl.: "Force Feedback"), das vorteilhaft insbesondere im Bereich von Steer-by-Wire(SbW)-Lenkssystemen in der Kraftfahrzeugtechnik eingesetzt werden kann. Das vorgeschlagene regelungstechnische Verfahren lässt sich dabei direkt auf die oben beispielhaft beschriebenen Systeme mit kinästhetischer Kopplung (z. B. Drive-by-Wire, Fly-by-Wire, Telemanipulation, etc.) übertragen. Hinsichtlich Steer-by-Wire(SbW)-Lenkssystemen kann das erfindungsgemäße Verfahren in vorteilhafter Weise mit den in den oben genannten Patentschriften DE 196 50 691 C2, DE 42 06 654 C2, DE 40 28 320 C2, DE 43 07 420 C1 und DE 199 18 597 C2 offenbarten Verfahren zur Fahrdynamikregelung per aktiver Lenkung kombiniert werden. 60 65

[0042] Ein System mit kinästhetischer Kopplung (Master-Slave System) besteht aus dem Bediengerät (Master) und ei-

nem ausführenden Gerät (Slave). Die bidirektionale Kopplung kann bezüglich der möglichen kartesischen Raumfreiheitsgrade ( $x, y, z$ ) und/oder bezüglich der Gelenkfreiheitsgrade ( $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ) um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse erfolgen. Zur Erfassung der Position und Orientierung und/oder Erfassung der Kräfte und Momente sind geeignete Sensoren und/oder Algorithmen für das Schätzen und Beobachten einzelner Signale und/oder Parameter erforderlich. Der Regler wird zu diesem Zweck auf einem Rechner implementiert.

**[0043]** Während im Stand der Technik für allgemeine Master/Slave-Systeme fest vorgegebene Reglerstrukturen angenommen werden, ist es ein Merkmal der vorliegenden Erfindung, dass sich die grundsätzliche Reglerstruktur aus der Aufgabenstellung ergibt. Die Aufgabenstellung besteht darin, ein zu einem vorgegebenen Referenzsystem äquivalentes dynamisches Verhalten des Master/Slave-Systems zu erreichen. Das Referenzsystem kann dabei ein real existierendes System sein, welches sich für die Handhabungsaufgabe als geeignet herausgestellt hat, oder auch ein durch einfache Parameter beschriebenes System, dessen Parameter und ggf. dessen Struktur der Bediener über eine Benutzerschnittstelle vorgibt. Das dynamische Verhalten des Referenzsystems kann zudem in Abhängigkeit eines oder mehrerer Parameter angenommen werden.

**[0044]** Eine einfache Struktur eines Referenzsystems kann zum Beispiel folgender Ausprägung sein:

- ein einfaches mechanisches Ersatzmodell, z. B. ein seriell und/oder paralleles Masse-Feder-Dämpfersystem,
- eine Teilmenge dieser Parameter
- oder eine Kombination dieser Parameter zu einem neuen Parameter (z. B. Anstiegszeit des Systems), welcher die Übertragungsdynamik spezifiziert.

**[0045]** Der Anwender kann dann für die gewählte Struktur des Referenzsystems die Parametrisierung des gewünschten Übertragungsverhalten über eine Benutzerschnittstelle spezifizieren, z. B. durch eine graphische Benutzeroberfläche mit Schieberegler (engl.: "Sliders"). Bei einer Änderung der Parameter, zum Beispiel durch Verschieben eines Parameters wird dann der bidirektionale Regler mit dem der Erfindung zugrundegelegten Verfahren neu berechnet.

**[0046]** Das Referenzsystem wird in einen manuellen Anteil und in einen Unterstützungsanteil unterteilt. Für beide Teilsysteme muss ein mathematisches Modell zur Verfügung gestellt werden, welches das dynamische Verhalten beschreibt. Für die mathematische Beschreibung des manuellen Teilsystems kommt hierfür ein physikalisches Modell oder ein experimentell ermitteltes Eingangs-/Ausgangs-Modell (Frequenzgänge) in Frage. Das physikalische Modell wird beispielsweise durch Übertragungsfunktionen im Laplace-Bereich beschrieben, das Eingangs-/Ausgangsmodell durch Frequenzgänge, welche in den zugehörigen Bode-Diagrammen mit ihren Amplituden- und Phasengängen dargestellt werden. Der Unterstützungsanteil lässt sich dabei durch Verschaltung von einzelnen linearen und nichtlinearen Systemanteilen darstellen. Vorzugsweise werden die nichtlinearen Systemanteile durch ein nichtlineares physikalisches Modell oder durch ein experimentell ermitteltes nichtlineares Kennfeld beschrieben.

**[0047]** Der Unterstützungsanteil ermöglicht die betriebspunktabhängige (z. B. arbeitsraum- und/oder geschwindigkeitsabhängige) Skalierung der Master/Slave-Dynamik, z. B. die Kompensation von Gewichtskräften.

**[0048]** Das erfindungsgemäße Verfahren sieht eine bidirektionale Rückführung der Positionen und/oder Kräfte über ein bidirektionales Regelungssystem vor.

**[0049]** Analog zum Referenzsystem wird das Master/Slave-System, bestehend aus Master, Slave und bidirektionalem Regelungssystem, dabei gedanklich in zwei Teilsysteme unterteilt, ein Teilsystem mit Hilfe dessen die manuelle Kopplung realisiert werden soll (vorzugsweise linearer Anteil) und ein Teilsystem für die Darstellung der Momenten- und/oder Kraftunterstützung (vorzugsweise nichtlinearer Anteil).

**[0050]** Der die manuelle Kopplung realisierende Anteil (M) und der die Unterstützung realisierende Anteil (U) des bidirektionalen Regelungssystems werden getrennt ausgelegt. Für die Auslegung von (M) wird zunächst eine generische Mehrgrößen-Reglerstruktur, die eine bidirektionale Rückführung der Positionen und/oder Kräfte impliziert, angenommen. Die Reglerstruktur wird als Übertragungsmatrix, d. h. als eine Matrix von Übertragungsfunktionen, angegeben. Die Modellgleichungen von M werden mit denen des linearen Anteils des Referenzsystems gleichgesetzt und algebraisch nach den einzelnen Regler-Übertragungsfunktionen aufgelöst.

**[0051]** Damit erhält man Struktur und Parametrisierung des linearen Master-Slave-Reglers. Für den nichtlinearen Anteil wird eine unidirektionale Rückführung von Position und/oder Kraft auf den Slave und/oder den Master angenommen. Dabei kann direkt das nichtlineare Modell oder Kennfeld, welches den nichtlinearen Anteil des Referenzsystems beschreibt, in der Rückführung für U verwendet werden.

**[0052]** Für die Realisierung der kinästhetischen Kopplung ist zusätzliche Hardware erforderlich, ein kraftreflektierendes Eingabegerät (Master), das dem Bediener das haptische Feedback vermittelt und das ausführende Gerät (Slave), das an der Umgebung die Arbeit verrichtet.

**[0053]** Der resultierende bidirektionale Regler ist dadurch gekennzeichnet, dass dieser die Dynamik des Masters und des Slaves kompensieren kann und dabei zusätzlich die vorgegebene Dynamik des Referenzsystems einstellt. Bei hinreichend schneller Master- und Slave-Dynamik, d. h. bei hinreichend großen Bandbreiten der Antriebe, kann auf diese Kompensation verzichtet werden. Durch zusätzliches Tiefpassfiltern muss der Regler ggf. kausal gemacht werden.

**[0054]** Wird für das Referenzsystem eine sehr hohe Dynamik angenommen, kann, aufgrund von Stellgrößen-Beschränkungen und/oder Bandbreitenbegrenzung der Antriebe, unter Umständen die Äquivalenz von Master und Slave physikalisch bedingt nicht erreicht werden.

**[0055]** Weitere Beschränkungen, die die Äquivalenz beeinträchtigen, resultieren aus Restriktionen bezüglich der Datenübertragung (Datenbus-Taktraten, Abtastraten, Diskretisierung), der Sensorik (Auflösung, Quantisierungseffekte, Sensordynamik, Filter) und/oder aufgrund von Totzeiten.

**[0056]** Der resultierende Regler muss also noch auf robuste Stabilität ggf. gegenüber Stellgrößen-Beschränkungen überprüft und an die oben erwähnten praktischen Erfordernisse angepasst werden.



## KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

- [0057] Weitere Eigenschaften, Merkmale, Vorteile und Anwendungen der zugrunde liegenden Erfindung resultieren aus den untergeordneten abhängigen Patentansprüchen sowie aus der folgenden Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung, welche in den folgenden Zeichnungen abgebildet sind. Hierin zeigen: 5
- [0058] Fig. 1 ein vereinfachtes 3D-Übersichtsdiagramm zur Veranschaulichung des manuellen Lenkungsanteils eines Steer-by-Wire(SbW)-Lenksystems mit kinästhetischer Kopplung nach einem Ausführungsbeispiel der zugrunde liegenden Erfindung für eine konventionelle Zahnstangen-Lenkung,
- [0059] Fig. 2 ein vereinfachtes 3D-Übersichtsdiagramm zur Veranschaulichung des Lenkunterstützungsanteils des erfindungsgemäßen Steer-by-Wire(SbW)-Lenksystems mit kinästhetischer Kopplung für eine konventionelle Zahnstangen-Lenkung. 10
- [0060] Fig. 3 ein dreidimensionales Diagramm zur Darstellung der statischen Lenkunterstützungscharakteristik einer exemplarischen elektromechanischen Servo-Lenkung nach dem Stand der Technik, wobei der Betrag für den Sollwert der Lenkunterstützungskraft  $\bar{F}_s$  [N] über dem Betrag des Fahrgeschwindigkeitsvektors  $\bar{v}$  [km/h] und dem Betrag des Lenksäulendrehmoments  $\bar{F}_{TS}$  [Nm] aufgetragen ist. 15
- [0061] Fig. 4 vier Bodediagramme zur Darstellung der Amplituden- und Phasengänge für einen idealen Regler (grau) und den implementierbaren Regler (schwarz, gestrichelt) nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung,
- [0062] Fig. 5 vier Bode-Diagramme zum Vergleich der Amplituden- und Phasengänge der Impedanz-Übertragungsfunktionen für eine exemplarische elektromechanische Servo-Lenkung (EPS, grau) nach dem Stand der Technik mit denen einer Steer-by-Wire-Lenkung (SbW, gestrichelt schwarz), die über das erfindungsgemäße Regelungssystem verfügt. 20
- [0063] Fig. 6 vier Zeitdiagramme zum Vergleich der Simulationsergebnisse für den Betrag des Lenkradmoments  $\bar{T}_{HW}$  [Nm], den Betrag der Reaktionskraft  $\bar{F}_{Reaction}$  [N], die durch die Spurstange auf die Zahnstange übertragen wird, den Lenkradlenkwinkel  $\phi_{HW}$  [°] und den Betrag der Spurstangenposition  $\bar{x}_{Rack}$  [mm] einer elektromechanischen Servo-Lenkung (EPS, grau) nach dem Stand der Technik sowie für eine Steer-by-Wire-Lenkung (SbW, gestrichelt schwarz), die über das erfindungsgemäße Regelungssystem verfügt, bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $v = 200$  km/h und einem Kraftschlusskoeffizienten von  $\mu = 1$  (Gummi auf Asphalt bei trockener Fahrbahn), 25
- [0064] Fig. 7 vier Zeitdiagramme zum Vergleich der Simulationsergebnisse für den Betrag des Lenkradmoments  $\bar{T}_{HW}$  [Nm], den Betrag der Reaktionskraft  $\bar{F}_{Reaction}$  [N], die durch die Spurstange auf die Zahnstange übertragen wird, den Lenkradlenkwinkel  $\phi_{HW}$  [°] und den Betrag der Spurstangenposition  $\bar{x}_{Rack}$  [mm] einer elektromechanischen Servo-Lenkung (EPS, grau) nach dem Stand der Technik sowie für eine Steer-by-Wire-Lenkung (SbW, gestrichelt schwarz), die über das erfindungsgemäße Regelungssystem verfügt, bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $v = 20$  km/h und einem Kraftschlusskoeffizienten von  $\mu = 0,2$  (Gummi auf Eis bei vereister nassglatter Fahrbahn) und 30
- [0065] Fig. 8 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Regelstrecke für ein Steer-by-Wire (SbW)-System nach einem Ausführungsbeispiel der zugrunde liegenden Erfindung, deren Blöcke durch die jeweils wirksamen Signale Geschwindigkeit ( $\bar{v}_D$ ,  $\bar{v}_{SWA}$ ,  $\bar{v}_{FWA}$  bzw.  $\bar{v}_{VD}$ ) und Kraft ( $\bar{F}_D$ ,  $\bar{F}_{SWA}$ ,  $\bar{F}_{FWA}$  bzw.  $\bar{F}_{VD}$ ) miteinander verbunden sind. 35
- [0066] Fig. 9 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung des Referenzsystems zur Definition des gewünschten Übertragungsverhaltens zwischen einem Bediener und der Umgebung.
- [0067] Fig. 10 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung eines Master-Slave Systems dessen Blöcke durch wirksame physikalische Größen miteinander verbunden sind. 40

## DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

- [0068] Im Folgenden werden die Funktionen der in einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung enthaltenen Baugruppen, wie in den Fig. 1, 2 und 8 abgebildet, näher beschrieben. Die Bedeutung der mit Bezugszeichen versehenen Symbole in den Fig. 1 bis 8 kann der beigegeführten Bezugszeichenliste entnommen werden. 45
- [0069] Das erfindungsgemäße Steer-by-Wire-System 804 besteht aus einer Lenkbetätigungseinrichtung 102 (z. B. einem Lenkrad, einem Joystick oder einem Sidestick), einem Aktuator 804a/c für die Krafterückkopplung ("Steering Wheel Actuator", SWA 804a) und einem Aktuator 804a/c, der den Vorderradlenkwinkel stellt ("Front Wheel Actuator", FWA 804c). Zusätzlich sind Sensoren zur Erfassung der Positionen (Lenkradlenkwinkel, Vorderradlenkwinkel bzw. Spurstangenposition) und/oder zur Erfassung der für die auftretenden Kräfte bzw. Momente (Handkraft bzw. -drehmoment, Spurstangenkraft) repräsentativen Signale erforderlich. Der SbW-Regler 804b ist auf einem Microcontroller implementiert. Für "Fail Safe"-Betrachtungen ist es unter Umständen erforderlich, Sensorik und Aktuatorik redundant auszulegen. 50
- [0070] Im Stand der Technik werden für Steer-by-Wire-Systeme mit Krafterückkopplung fest vorgegebene Reglerstrukturen angenommen. Merkmal der vorliegenden Erfindung ist, dass sich die Reglerstruktur 804b aus der Aufgabenstellung ergibt. Prinzipiell kann das Referenzsystem beliebig sein. Das Referenzsystem kann eine rein manuelle Lenkung (MS) sein, eine hydraulische Lenkung (HPS) oder eine elektromechanische Servo-Lenkung (EPS). Das dynamische Verhalten des Referenzsystems kann zudem dem einer MS, HPS oder EPS mit variabler Lenkübersetzung entsprechend angenommen werden, die z. B. an Fahrgeschwindigkeit und/oder Lenkradwinkel angepasst ist. Darüber hinaus lässt sich die Erfindung auch gut mit einer Fahrdynamikregelung auf Grundlage der aktiven Lenkung zur Gierstabilisierung und/oder Kippvermeidung kombinieren. 55
- [0071] Das Referenzsystem wird in zwei Teilsysteme unterteilt, in einen manuellen in diesem Fall näherungsweise linearen Anteil 100 (M) und einen die Lenkkraft unterstützenden in diesem Fall nichtlinear angenommen Anteil 200 (U). Für beide Teilsysteme muss ein mathematisches Modell zur Verfügung gestellt werden, welches das dynamische Verhalten beschreibt. Für die mathematische Beschreibung des linearen Teilsystems kommt hierfür ein physikalisches Modell oder ein experimentell ermitteltes Eingangs-/Ausgangs-Modell (Frequenzgänge) einer manuellen Lenkung oder des manuellen Anteils einer hydraulischen oder einer elektromechanischen Servo-Lenkung in Frage. Das physikalische Modell wird zum Beispiel durch Übertragungsfunktionen im Laplace-Bereich beschrieben, das Eingangs-/Ausgangsmodell durch Frequenzgänge, welche in den zugehörigen Bode-Diagrammen durch ihre Amplituden- und Phasengänge darstell- 60

bar sind.

[0072] Der nichtlineare Unterstützungsanteil **200** (U) lässt sich durch Parallel- bzw. Reihenschaltung von linearen und nichtlinearen Systemanteilen darstellen. Das nichtlineare Teilsystem lässt sich vorzugsweise durch ein nichtlineares physikalisches Modell oder durch ein experimentell ermitteltes nichtlineares Kennfeld beschreiben, der lineare Systemanteil

5 durch ein physikalisch motiviertes Modell oder durch experimentell ermittelte Frequenzgänge.

[0073] Das erfindungsgemäße Verfahren sieht dabei eine bidirektionale Rückführung der Positionen und/oder Kräfte vor.

[0074] Der lineare Anteil **100** und der nichtlineare Anteil **200** des Steer-by-Wire-Regelungssystems **804b** werden getrennt ausgelegt. Für die Auslegung des linearen Anteils **200** wird zunächst eine generische Mehrgrößen-Reglerstruktur, die eine bidirektionale Rückführung der Positionen und/oder Kräfte impliziert, angenommen. Die Reglerstruktur **804b** wird als eine Übertragungsmatrix, d. h. als eine Matrix von Übertragungsfunktionen, angegeben. Die Modellgleichungen des linearen Anteils des Steer-by-Wire-Systems **804** werden mit denen des linearen Anteils **100** des Referenzsystems gleichgesetzt und algebraisch nach den einzelnen Regler-Übertragungsfunktionen aufgelöst. Damit erhält man Struktur und Parametrisierung des linearen Steer-by-Wire-Reglers. Für den nichtlinearen Anteil **200** wird eine unidirektionale Rückführung von Position und/oder Kraft auf den FWA **804c** angenommen. Hierbei kann direkt das nichtlineare Modell oder Kennfeld, welches den nichtlinearen Anteil des Referenzsystems beschreibt, in der Rückführung verwendet werden.

[0075] Der resultierende lineare SbW-Regler **804b** ist dadurch gekennzeichnet, dass dieser die Dynamik **806** von SWA **804a** und FWA **804c** kompensieren kann. Jedoch muss der resultierende ideale Regler **804b** noch auf robuste Stabilität überprüft und an die praktischen Erfordernisse angepasst werden.

[0076] Beispielsweise kann auf eine Dynamikkompensation von SWA **804a** und FWA **804c** verzichtet werden. Durch zusätzliche Tiefpassfilterung muss der Regler **804b** ggf. kausal gemacht werden.

[0077] Das Verfahren lässt sich in vorteilhafter Weise auch auf SbW-Lenkssysteme **804** mit Hinterradlenkung erweitern.

25 [0078] Nachfolgend aufgeführt sind hierzu einige Figuren. In Fig. 1 und 2 ist schematisiert und stark vereinfacht eine elektromechanische Lenkung ("Rack Drive EPS") dargestellt, die sich gedanklich in einen manuellen (in erster Näherung linearen) Lenkungsanteil **100** und einen (nichtlinearen) Lenkunterstützungsanteil **200** aufteilen lässt. Fig. 3 zeigt eine entsprechende Lenkunterstützungsscharakteristik **300**, wie sie typischerweise für rein stationäre Betrachtungen für ein EPS-System angenommen werden.

30 [0079] Fig. 3 zeigt eine typische statische Unterstützungskennlinie **300** eines EPS-Systems. Für das manuelle Lenksystem **100** ohne Lenkkraftunterstützung gilt dabei, dass der Sollwert für den Betrag der Lenkunterstützungskraft  $F_{a,PS}$  des Lenksystems gleich Null ist. Die verbleibende Dynamik, welche nachfolgend als "manueller Lenkanteil" bezeichnet werden soll, wird als linear angenommen. Die Grundlage für den hierbei verfolgten Ansatz ist die Idee, jetzt auch das SbW-System **804** in zwei Teilsysteme **100** und **200** zu unterteilen und diese Teile gedanklich wie folgt dem manuellen und dem unterstützten Anteil zuzuordnen:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{HW} \\ x_{Rack} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{HW} \\ F_{Reaction} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S_{23} \end{bmatrix} \cdot F_{a,SbW} \quad (3)$$

40 wobei

$F_{a,SbW}$  [N] der Sollwert für den Betrag der Lenkunterstützungskraft  $\bar{F}_{a,SbW}$  des SbW-Systems ist,

$F_{Reaction}$  [N] der Betrag der Spurstangenkraft  $\bar{F}_r$  für eine elektromechanische Servolenkung nach dem Stand der Technik ist, die durch die Spurstange auf die Zahnstange **110a** bzw. die Spurstange **110b** übertragen wird,

45  $S_{ij}$  lineare Übertragungsfunktionen sind,

$T_{HW}$  [Nm] der Betrag des Lenkradmoments  $\bar{T}_h$  einer elektromechanischen Servolenkung nach dem Stand der Technik ist,

$x_{Rack}$  [mm] der Betrag der Spurstangenposition  $\bar{x}_r$  einer elektromechanischen Servolenkung nach dem Stand der Technik ist und

50  $\varphi_{HW}$  [°] der Lenkradlenkwinkel einer elektromechanischen Servolenkung nach dem Stand der Technik ist.

[0080] Offensichtlich kann dabei die Äquivalenz beider Systeme nur erreicht werden falls  $S_{ij} = P_{ij}$  ist und die gleiche Unterstützungskraft ( $F_{a,SbW} = F_{a,PS}$ ) implementiert wird. Nachfolgend wird daher die Äquivalenz von manuellem Lenkanteil **100** und Lenkkraftunterstützungsanteil **200** getrennt untersucht.

55 [0081] Manueller Lenkanteil einer Servo-Lenkung und entsprechender linearer Anteil **100** des SbW-Lenksystems sind exakt gleich, falls  $S_{ij} = P_{ij}$  gilt. Aufgrund praktischer Restriktion kann das Ziel jedoch nicht exakt erreicht werden. Um dennoch nachzuweisen, dass ein gewisses Maß an Übereinstimmung vorhanden ist, wird die Äquivalenz der beiden Systeme anhand der zu den  $P_{ij}$  bzw.  $S_{ij}$  gehörenden Bode-Frequenzgängen im Sinne eines  $H_\infty$ -Güte-Äquivalenzkriteriums bewertet. Dieses Kriterium basiert auf skalierten Admittanz-Matrizen. Der Begriff "Admittanz" kennzeichnet dabei den Zusammenhang zwischen Kraft und Geschwindigkeit. Die Admittanz-Matrizen der linearen Lenkanteile der Servo-Lenkung und des SbW-Lenksystems sind dabei gegeben durch

$$\underline{Y}_{PS}(s) = s \cdot \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \underline{Y}_{SbW}(s) = s \cdot \begin{bmatrix} S_{11}(s) & S_{12}(s) \\ S_{21}(s) & S_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

65 [0082] Da zwischen den Reifenkräften und dem vom Fahrer aufgebrauchten Lenkraddrehmoment bzw. dem Lenkraddrehwinkel und der Spurstangenposition unterschiedliche Übersetzungsverhältnisse vorherrschen, wird eine Skalierung der Admittanz-Matrizen vorgenommen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden zwei konstante Skalierungsfaktoren  $n_v$



und  $n_f$  eingeführt werden. Die skalierten Admittanz-Matrizen sind demzufolge durch

$$\underline{Y}_{PS,s}(s) = s \cdot \begin{bmatrix} P_{11}(s) & \frac{1}{n_f} \cdot P_{12}(s) \\ n_v \cdot P_{21}(s) & \frac{n_v}{n_f} \cdot P_{22}(s) \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad (5)$$

$$\underline{Y}_{SbW,s}(s) = s \cdot \begin{bmatrix} S_{11}(s) & \frac{1}{n_f} \cdot S_{12}(s) \\ n_v \cdot S_{21}(s) & \frac{n_v}{n_f} \cdot S_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

gegeben, wobei  $n_v$  und  $n_f$  so gewählt werden, dass die stationären Verstärkungen sämtlicher Elemente von  $\underline{Y}_{PS,s}(s)$  gleich sind. Eine genauere Betrachtung führt dabei auf

$$n_f = 1/n_v = i_p \quad (6)$$

wobei  $i_p$  das Übersetzungsverhältnis zwischen Ritzel **108** und Zahnstange **110a** ist.

[0083] Um eine gute Übereinstimmung der beiden Systeme zu erzielen, muss der SbW-Regler **804b** so entworfen werden, dass die  $H_\infty$ -Norm der Differenz der skalierten Admittanz-Matrizen

$$J := \left\| \underline{Y}_{SbW,s}(s) - \underline{Y}_{PS,s}(s) \right\|_\infty \quad (6)$$

möglichst klein wird. Spezifikation dieser Art werden typischer Weise beim Entwurf von Master/Slave-Systemen im Frequenzbereich verwendet. In dem der Erfindung zugrunde liegenden Ansatz wird jedoch für den reglungstechnischen Entwurf nicht die hier übliche  $H_\infty$ -Methodik angewandt. Der lineare Regler **804b** wird vielmehr exakt durch Lösen eines algebraischen Gleichungssystems bestimmt. Da die Implementierung notwendigerweise mit Abweichungen von diesem theoretischen Regler verbunden ist, wird das in Formel (6) definierte Gütekriterium dazu verwendet, den linearen Anteil **100** des SbW-Systems **804** zu beurteilen.

[0084] Die Äquivalenzforderung für den nichtlinearen Unterstützungsanteil kann relativ einfach erfüllt werden. Diese Forderung impliziert, dass  $F_{a,SbW} = F_{a,PS}$  und  $S_{23} = P_{23}$  gelten muss. Falls  $\bar{F}_{a,PS}$  auf dem Steuergerät implementiert ist, wie es beispielsweise bei EPS-Systemen der Fall ist, kann der gleiche Algorithmus auch für SbW verwendet werden. Das beim EPS vom Drehstab gemessene Lenksäulendrehmoment  $\bar{T}_{TS}$  muss bei SbW durch ein virtuelles entsprechendes Signal ersetzt werden, welches anhand eines geeigneten Modells erzeugt wird. Wird die Kraft  $\bar{F}_{a,PS}$  mechanisch erzeugt, wie dies bei hydraulischen Lenksystemen der Fall ist, so kann ein Modell dieses Systems im SbW-Lenksystem **804** verwendet werden.

[0085] Beim Entwurf des SbW-Reglungssystems **804** ist es erforderlich, neben der Stabilität des SbW-Reglungssystems **804** auch die Interaktion mit der Umgebung zu betrachten. Namentlich sind dies die Fahrerimpedanz **802**, die mit dem SbW-System **804** über das Lenkrad verbunden ist, und die Fahrzeugimpedanz **806**, verbunden über die Zahnstange **110a** bzw. die Spurstange **110b**. Für einen Stabilitätsnachweis des gesamten Systems kann die sogenannte "Passivitätstheorie" angewandt werden. Hierzu werden Ergebnisse für allgemeine Telemanipulationssysteme auf SbW übertragen. Ein bilaterales Manipulationssystem besteht dabei aus fünf interagierenden Subsystemen: dem Mensch als Bediener, dem Master-Manipulator, dem Regler, dem Slave-Manipulator und der Umgebung.

[0086] Analog hierzu besteht ein SbW-System aus dem Fahrer **802**, einem kraftreflektierendem Lenkrad bzw. Lenkradaktuators **804a** (engl.: "Steering Wheel Actuator", SWA), dem Regler **804b**, einem Vorderradlenkaktuators **804c** (engl.: "Front Wheel Actuator", FWA) und dem Fahrzeug **806**, wie in Fig. 8 dargestellt. Die einzelnen Blöcke **802**, **804a-c** und **806** sind über die jeweils wirksamen Signale Geschwindigkeit und Kraft verbunden. Eine hinreichende, wenn auch konservative Bedingung für die robuste Stabilität des Gesamtsystems ist die Passivität der fünf Teilsysteme. Da FWA **804c** und SWA **804a** aktive Elemente sind, werden zunächst die drei Teilsysteme FWA **804c**, SWA **804a** und Regler **804b** zu einem einzigen System **804** verbunden. Die Passivitätsbedingung für das zusammengefasste System **804** ist weniger restriktiv als die Bedingung für simultane Passivität der drei Einzelsysteme **804a-c**. Nachfolgend werden die Passivitätsbetrachtungen lediglich für den linearen Lenkanteil **100** des SbW-Systems durchgeführt.

[0087] Eine Servo-Lenkung, deren dynamisches Verhalten auf SbW übertragen werden soll, kann vorgeben werden durch

- ein detailliertes mathematisches Modell im Sinne von Differentialgleichungen mit physikalischen Parameter oder
- eine mittels Identifikation bestimmte Matrix von Frequenzgängen.

[0088] Entsprechend Formel (1) sind in beiden Fällen die betrachteten Eingänge der Betrag des Lenkraddrehmoments  $\bar{T}_{HW}$  [Nm] und der Betrag der Reaktionskraft  $\bar{F}_{Reaction}$  [N] an der Zahnstange **110a** bzw. der Spurstange **110b**. Die Ausgänge sind der Lenkradlenkwinkel  $\phi_{HW}$  [°] und der Betrag der Spurstangenposition  $\bar{x}_{Rack}$  [mm]. Für lineare Betrachtungen kann die Dynamik durch eine  $2 \times 2$ -Übertragungsmatrix beschrieben werden, wobei die folgende Vorzeichenkonvention gelten soll: Positive Werte für den Betrag des Lenkradmoments  $\bar{T}_{HW}$  oder der Reaktionskraft  $\bar{F}_{Reaction}$  führen stationär zu Geschwindigkeiten  $\dot{\phi}_{HW}$  und  $\dot{\bar{x}}_{Rack}$  mit positiven Beträgen. Damit werden alle Elemente der Admittanzma-



trix  $\underline{Y}_{PS}(s)$  positiv, wenn  $s$  gleich Null ist.

[0089] Die Aufgabe eines Steer-by-Wire(SbW)-Reglers **804** ist es, die Sollmomente für den Vorderradlenkaktuator **804c** (also das Drehmoment  $\bar{F}_{FWA,ref}$ ) und den Lenkradaktuator **804a** (Drehmoment  $\bar{F}_{SWA,ref}$ ) bereitzustellen. Zu diesem Zweck wird die folgende SbW-Reglerstruktur **804b** vorgeschlagen:

$$\begin{bmatrix} T_{SWA,ref} \\ T_{FWA,ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{HW} \\ x_{Rack} \\ T_{HW} \\ F_{Reaction} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{15} \\ C_{25} \end{bmatrix} \cdot F_a \quad (7)$$

[0090] Im Allgemeinen verwendet der Regler **804b** die dynamische Rückführung aller Eingangsgrößen ( $\Phi_{HW}$ ,  $x_{Rack}$ ,  $T_{HW}$  und  $F_{Reaction}$ ). Zusätzlich wird eine gedankliche Unterstützungskraft  $\bar{F}_a$  entsprechend der Unterstützungskennlinie der elektrischen oder hydraulischen Servo-Lenkung in Formel (2) verwendet. Hierfür kann das Drehmoment  $\bar{F}_{TS}$  modellbasiert ermittelt werden. In einem ersten Entwurfschritt wird dabei ein idealer SbW-Regler **804b** so berechnet, dass die durch die Formeln (1) und (3) wiedergegebenen Reglerübertragungsverhalten äquivalent sind. Dabei ist zu beachten, dass die in Formel (7) eingeführte Reglerstruktur **804b** mehr Freiheitsgrade besitzt als notwendig. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine geringere Anzahl von Sensoren vorteilhaft ist. Aus diesem Grund wird nachfolgend von einer bidirektionalen Positionsrückführung ausgegangen. Auf Kraft und Momentensensorik wird dabei verzichtet, d. h. es ist

$$C_{13} = C_{14} = C_{23} = C_{24} = 0.$$

[0091] Die Unterstützungskraft  $\bar{F}_a$  wirkt nur unidirektional auf den Vorderradlenkaktuator, weswegen  $C_{15} = 0$  ist.

[0092] Falls mathematische Modelle vom SbW-System **804** inklusive FWA **804c** und SWA **804a** sowie der Servo-Lenkung als Referenzsystem vorliegen, können diese Modelle dazu verwendet werden, einen idealen SbW-Regler **804b** herzuleiten. Das algebraische Lösen aller Gleichungen  $S_{ij} = P_{ij}$  führt auf eine eindeutige Lösung für den Regler **804b**. Mit diesem theoretischen Regler stimmen die Admittanz-Matrizen von SbW und Servo-Lenkung exakt überein, und das Gütemaß  $J$  in Formel (6) erreicht den idealen Wert Null. Verwendet man den gleichen Algorithmus in Formel (7) wie durch Formel (2) gegeben, um den Sollwert der Lenkunterstützungskraft  $\bar{F}_a$  zu berechnen, dann stimmen SbW und Servo-Lenkung auch im nichtlinearen Anteil **200** exakt überein. Aus praktischen Gründen muss dazu der Regler **804b** modifiziert werden. Bevor diese Anpassung vorgenommen wird, ist es sinnvoll, am idealen SbW-System **804** – falls möglich – einige Vereinfachungen vorzunehmen:

1.  $C_{11}$  vereinfacht sich signifikant, falls die Unterschiede in der Dynamik der Lenkräder von SbW und konventioneller Lenkung vernachlässigt werden können.
2.  $C_{22}$  vereinfacht sich signifikant, falls das gleiche Lenkgetriebe für SbW und die konventionelle Lenkung verwendet wird.
3.  $C_{22}$  vereinfacht darüber hinaus, falls der Aktuator für die Servo-Unterstützung als Vorderradlenkaktuator **804c** bei SbW eingesetzt wird.
4. Weiterhin wird aus den ermittelten Reglergleichungen ersichtlich, dass bei SbW die entsprechende Aktuatordynamik ( $S_{FWA,ref}(s)$  und  $S_{SWA,ref}(s)$ ) kompensiert werden muss. Falls die Aktuatoren **804a** + **c** entsprechend leistungsfähig sind, d. h. eine hohe Bandbreite besitzen, kann auf die Kompensation verzichtet werden.
5. Gegebenenfalls müssen nicht-kausale Terme in  $C_{ij}$  durch eine entsprechende Erweiterung mit Tiefpassfiltern realisierbar gemacht werden.

[0093] Die idealen Übertragungsfunktionen für ein spezielles Paar PS-SbW sind in Fig. 4 grau dargestellt, deren implementierbare Näherung mit den oben beschriebenen Vereinfachungen gestrichelt.

[0094] Als Referenzsystem für das SbW-System **804** können auch durch Identifikation der Servo-Lenkung ermittelte Frequenzgänge verwendet werden. Die Gleichungen der obigen Äquivalenzbedingung  $S_{ij} = P_{ij}$  werden für die Reglerübertragungsfunktionen  $C_{ij}$  gelöst. Hierbei werden Amplitude und Phase der Reglerübertragungsfunktionen jeweils für ein Frequenzraster berechnet. Durch Approximationen im Frequenzbereich kann schließlich ein implementierbarer (kausaler) Regler **804b** ermittelt werden.

[0095] Im Folgenden soll der Linearanteil **100**, d. h. der manuelle Lenkanteil des SbW-Systems, untersucht werden. Fig. 5 zeigt die Amplituden- und Phasengänge der einzelnen Elemente der Admittanz-Matrizen  $\underline{Y}_{PS,s}(s)$  und  $\underline{Y}_{SbW,s}(s)$  entsprechend Formel (4) für ein reales EPS-System (grau dargestellt) und das in seinen Übertragungseigenschaften diesem nachgebildete SbW-System **804** (gestrichelt dargestellt). Dies lässt eine gute Übereinstimmung der beiden Systeme erkennen. Die Zunahme der Resonanzüberhöhung bei SbW lässt sich durch Ergänzung des Reglers **804b** mit weiteren Filtern reduzieren.

[0096] Abschließend sollen die in Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren durchgeführten Simulationen und deren Ergebnisse beschrieben werden, wie in den Fig. 6 und 7 dargestellt.

[0097] Die Analyse des nichtlinearen SbW-Systems **804**, besteht aus linearem manuellen Lenkanteil **100** und nichtlinearem Unterstützungsanteil **200**, wird nach einem Ausführungsbeispiel der zugrunde liegenden Erfindung mit einem Fahrdynamikmodell durchgeführt. Desweiteren werden im Rahmen des erfindungsgemäßen Ansatzes nichtlineare FWA-Modelle **804c** und SWA-Modelle **804a** verwendet. Für die Simulationen wird eine sinusförmige Anregung des Lenkradmomentes  $\bar{T}_{HW}$  mit einer Amplitude von 3,2 Nm gewählt. Die Straße wurde dabei als trocken angenommen (Rollreibung  $\mu = 1$ ) und die Fahrgeschwindigkeit  $v$  betrug 80 km/h. Die in Fig. 6 dargestellten Ergebnisse **600** zeigen dabei eine

schr gute Übereinstimmung von SbW und EPS. Vergleichbar gute Ergebnisse können auch für andere Fahrgeschwindigkeiten aus dem Betriebsbereich eines Straßenkraftfahrzeugs und bei unterschiedlichen Straßenverhältnissen erzielt werden. Bei einer praktischen Umsetzung ist die Dynamik der beteiligten Komponenten im Gegensatz zu den vorliegenden Simulationsergebnissen nicht perfekt. Daher ist mit größeren Abweichungen als hier gezeigt zu rechnen. Die Simulationen verdeutlichen dennoch, dass sich unter Verwendung der vorgestellten Methode zur SbW-Reglersynthese eine sehr gute Übereinstimmung des Lenkgefühls von SbW zu einem Referenzsystem erzielen lässt. Es sei abschließend angemerkt, dass neben realen konventionellen Lenksystemen auch Systeme mit frei wählbarer Dynamik als Referenzsysteme für den SbW-Reglerentwurf dienen können. Darüber hinaus ist das vorgestellte Verfahren prinzipiell dazu geeignet, anstelle der gezeigten bidirektionalen Positionsrückführung Mischformen aus Positions- und Kraftrückführungen zu realisieren.

**[0098]** Mögliche Gebiete der gewerblichen Anwendungen der zugrunde liegenden Erfindung sind beispielsweise

- Drive-by-Wire-Systeme, z. B. Steer-by-Wire-Lenksysteme, kraftreflektierendes Gaspedal, Brake-by-Wire (z. B. in der Fahrzeugindustrie für LKW/PKW, Militär- und Sonderfahrzeuge sowie in der Fahrzeugzulieferindustrie, vor allem im Bereich der Lenkungshersteller),
- Fly-by-Wire (in der Luftfahrtindustrie),
- Telemanipulations- und Telepräsenzsysteme (in der Robotik, Weltraumrobotik oder Medizintechnik, für Roboter in der Chirurgie und minimal invasiven Chirurgie oder in der Mikrosystemtechnik),
- Maschinen und Anlagenbau (zur Kopplung von Antrieben in der Förder-, Handhabungs- und Verpackungstechnik, z. B. bei Stetigförderern oder bei der Handhabung von Bandgut wie z. B. Folien, Papier oder Textilien).

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Auslegung eines Reglers für ein Master/Slave-System, das ein bidirektionales Regelungssystem aufweist und dessen dynamisches Verhalten möglichst äquivalent zu dem eines vorgegebenen Referenzsystems sein soll, aufweisend die folgenden Schritte:
  - Vorgabe eines mathematischen Modells für das dynamische Verhalten des Referenzsystems,
  - Vorgabe der Rückführgrößen und
  - Ermittlung der Struktur und Parametrisierung des Reglers abhängig von dem mathematischen Modell des dynamischen Verhaltens des vorgegebenen Referenzsystems und den vorgegebenen Rückführgrößen.
2. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das mathematische Modell des Referenzsystems und des Master/Slave-Systems jeweils in ein lineares und ein separates nichtlineares Teilsystem für das dynamische Verhalten aufgespalten werden, die separat voneinander ausgelegt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur Auslegung das lineare Teilsystem des Referenzsystems mit demjenigen des Master/Slave-Systems und das nichtlineare Teilsystem des Referenzsystems mit demjenigen des Master/Slave-Systems gleichgesetzt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass für das lineare Teilsystem eine bidirektionale Rückführung zwischen Master und Slave angenommen wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Veränderung der Struktur und Parametrisierung des linearen Teilsystems des Master-Slave Systems von einer generischen Mehrgrößen-Reglerstruktur ausgegangen wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - als mathematisches Modell eine Matrix der Übertragungsfunktionen des Referenzsystems gebildet wird und das ausgehend von der generischen Mehrgrößen-Reglerstruktur:
  - eine Matrix der Übertragungsfunktionen des Master-Slave Systems gebildet wird,
  - die Matrizen der Übertragungsfunktionen des Master/Slave-Systems mit denen des Referenzsystems gleichgesetzt werden, und
  - das resultierende Gleichungssystem nach den einzelnen Regler-Übertragungsfunktionen des Master/Slave-Systems aufgelöst werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass für das nichtlineare Teilsystem eine unidirektionale oder bidirektionale Rückführung zwischen Master und Slave angenommen wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass für die Rückführung wenigstens ein nichtlineares Modell oder Kennfeld verwendet wird, so dass das nichtlineare Teilsystem des Master-Slave Systems das nichtlineare Teilsystem des Referenzsystems wiedergibt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das mathematische Modell des Referenzsystems und des Master/Slave-Systems jeweils in ein Teilsystem, das das Verhalten einer manuellen Kopplung zwischen einem Bediener und der Umgebung wiedergibt, und ein weiteres Teilsystem aufgespalten werden, das eine Momenten- und/oder Kraftunterstützung oder -reduktion wiedergibt, wobei die genannten Teilsysteme separat voneinander ausgelegt werden.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass durch Wahl des Referenzsystems eine Skalierung der zwischen Bediener und Umgebung ausgetauschten physikalischen Größen eingestellt werden kann.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Benutzer Parameter des mathematischen Modells des Referenzsystems einstellen kann, um ein gewünschtes dynamische Verhalten des Master/Slave-Systems zu wählen, und der Regler abhängig von den eingestellten Parametern ausgelegt wird.
12. Verwendung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche zur Auslegung eines Reglers für ein X-by-wire-System.



13. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zur Auslegung eines Reglers für Telemanipulations- oder Telepräsenzsysteme.
14. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zur Auslegung eines Reglers zur Kopplung von Antrieben im Maschinen- und Anlagenbau.
15. Bidirektionaler Regler für ein Master/Slave-System, der das dynamische Verhalten des Master/Slave-Systems möglichst äquivalent dem eines vorgegebenen Referenzsystems anpasst, dadurch gekennzeichnet, dass der Regler in einen linearen und einen separaten nichtlinearen Anteil aufgespalten ist, die unabhängig voneinander auslegbar sind.
16. Bidirektionaler Regler für ein Master/Slave-System, der das dynamische Verhalten des Master/Slave-Systems möglichst äquivalent dem eines vorgegebenen Referenzsystems anpasst, dadurch gekennzeichnet, dass der Regler aus zwei Anteilen besteht, wobei ein Anteil, die manuelle Kopplung zwischen dem Bediener und der Umgebung einstellt, und der andere Anteil, eine Momenten- und/oder Kraftunterstützung oder -reduktion einstellt.
17. Regler nach einem der Ansprüche 15 oder 16, gekennzeichnet durch eine Benutzerschnittstelle, mittels der Parameter eines Modells des Referenzsystems einstellbar sind, um ein gewünschtes dynamisches Verhalten des Master/Slave-Systems vorzugeben.
18. Regler nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Benutzerschnittstelle eine Skalierung der zwischen Bediener und Umgebung ausgetauschten physikalischen Größen eingestellt werden kann.
19. Bidirektionaler Regler für ein Master/Slave-System der das dynamische Verhalten des Master/Slave-Systems möglichst äquivalent dem eines vorgegebenen Referenzsystems anpasst, gekennzeichnet durch eine Benutzerschnittstelle, mittels der Parameter eines Modells des Referenzsystems einstellbar sind, um ein gewünschtes dynamisches Verhalten des Master/Slave-Systems vorzugeben.
20. Verwendung eines Reglers nach einem der Ansprüche 15 bis 19 für ein X-by-wire-System.
21. Verwendung eines Reglers nach einem der Ansprüche 15 bis 19 für Telemanipulations- oder Telepräsenzsysteme.
22. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 15 bis 19 zur Kopplung von Antrieben im Maschinen- und Anlagenbau.
23. Steer-by-Wire-System, dadurch gekennzeichnet, dass es einen Regler nach einem der Ansprüche 15 bis 19 aufweist.
24. Steer-by-Wire-Lenksystem, welches eine kinästhetische Kopplung zwischen mindestens einer Lenkbetätigungseinrichtung (102) zur Steuerung des Lenkverhaltens durch den Benutzer, bestehend aus Sensoren zur Erfassung der am Bediengeräte eingestellten Position und/oder Winkel und/oder Sensoren zur Aufnahme der auf die Lenkbetätigungseinrichtung (102) wirkenden Kräfte und/oder Drehmomente und mindestens einem Aktuator (804c) zur Stellung der Spurstangenposition oder der Vorderradlenkwinkel abhängig von der durch die Lenkbetätigungseinrichtung (102) vorgegebenen Steuerung aufweist und weiterhin über mindestens einen Aktuator (804a) zur Bewerkstelligung der Kraftrückkopplung zwischen der Lenkbetätigungseinrichtung (102) und dem Aktuator (804c) zur Stellung der Spurstangenposition oder Vorderradlenkwinkel, mindestens je einen Sensor zur Erfassung der aktuellen Lenkradlenkwinkel, und/oder Spurstangenposition oder Vorderradlenkwinkel des Kraftfahrzeugs (806) und/oder mindestens je einen Sensor zur Aufnahme von Handkraft oder Handdrehmoment und/oder Spurstangenkraft oder Vorderradlenkmoment, mindestens ein bidirektionales Regelungssystem (804b) zur Rückführung gemessener Positionen, Winkel, Kräfte und/oder Drehmomente von der Lenkbetätigungseinrichtung (102) zu den beiden Aktuatoren (804a + c) sowie von den beiden Aktuatoren (804a + c) zur Lenkbetätigungseinrichtung (102) und mindestens einen Datenbus (808) zum Austausch von Sensor- und Aktuatorsignalen zwischen Lenkbetätigungseinrichtung (102) und den beiden Aktuatoren (804a + c) verfügt, um dem Fahrer (802) des Kraftfahrzeugs neben der Ausführung des eigentlichen Lenkvorgangs auch haptische Informationen über die Fahrdynamik (806) bei Lenkvorgängen zu vermitteln, wobei das dynamische Verhalten des Steer-by-Wire-Lenksystems an das eines hinsichtlich Struktur und Parametrisierung vorgebbaren Referenzsystems über einen Regler (804b) ist.
25. System nach Anspruch 24, gekennzeichnet durch eine Benutzerschnittstelle, durch die die Parametrisierung des Referenzsystems vorgegeben werden kann.
26. System nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Benutzerschnittstelle grafische, sprachliche und/oder manuelle Bedienelemente aufweist.
27. System nach einem der Ansprüche 24 bis 26, gekennzeichnet durch eine Aufteilung des Referenzsystems in einen linearen manuellen Anteil zur Modellierung des dynamischen Verhaltens der manuellen Lenkung durch den Benutzer und/oder des manuellen Anteils einer hydraulischen oder elektromechanischen Servo-Lenkung und einen nichtlinearen Lenkkraftunterstützungsanteil zur Modellierung der betriebspunktabhängigen Skalierung des dynamischen Verhaltens von Bediengerät (804a), ausführendem Gerät (804c) und der Kopplung zwischen Bediengerät (804a) und ausführendem Gerät (804c), deren Dynamik durch physikalisch Modelle beschrieben wird, wobei die linearen Anteile durch Übertragungsfunktionen im Laplace-Bereich darstellbar sind.
28. System nach einem der Ansprüche 24 bis 26, gekennzeichnet durch eine Aufteilung des Referenzsystems in einen linearen manuellen Anteil zur Modellierung des dynamischen Verhaltens der manuellen Lenkung durch den Benutzer und/oder des manuellen Anteils einer hydraulischen oder elektromechanischen Servo-Lenkung und einen nichtlinearen Lenkkraftunterstützungsanteil zur Modellierung der betriebspunktabhängigen Skalierung des dynamischen Verhaltens von Bediengerät (804a), ausführendem Gerät (804c) und der Kopplung zwischen Bediengerät (804a) und ausführendem Gerät (804c), deren Dynamik durch experimentell ermittelte Eingangs-/Ausgangs-Modelle beschrieben wird, wobei die linearen Anteile durch ihren Amplitudengang (402a, 404a, 406a, 408a) und Phasengang (402b, 404b, 406b, 408b) darstellbar sind.



29. System nach einem der Ansprüche 24 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass der Regler eine Tiefpass-Filterfunktion aufweist, welche so beschaffen ist, dass das Regelungssystem (804b) die Kausalitätsanforderung erfüllt.
30. System nach einem der Ansprüche 24 bis 28, gekennzeichnet durch die Implementierung einer variablen, an Fahrgeschwindigkeit und/oder Lenkradlenkwinkel angepassten Lenkübersetzung und/oder einer variablen Lenk-  
kraftunterstützung. 5
31. System nach einem der Ansprüche 24 bis 30, gekennzeichnet durch eine Fahrdynamikregelung zur Kippvermeidung und Gierstabilisierung des Kraftfahrzeugs (806).
32. System nach einem der Ansprüche 24 bis 31, gekennzeichnet durch Mittel zur haptischen Rückmeldung kritischer Fahrzustände auf die Lenkbetätigungseinrichtung (102).
33. System nach einem der Ansprüche 24 bis 32, gekennzeichnet durch eine Aufteilung des Regelungssystems (804b) in 10  
einen linearen Anteil zur Realisierung der manuellen Kopplung, für den eine generische Reglerstruktur angenommen wird, welche eine bidirektionale Rückführung der gemessenen Positionen und/oder Kräfte impliziert,  
einen nichtlinearen Anteil zur Einstellung der Lenkunterstützung, für den eine unidirektionale Rückführung der gemessenen Positionen und/oder Kräfte auf den Aktuator (804c), der den Vorderradlenkwinkel stellt, angenommen 15  
wird, wobei der lineare Anteil des besagten Regelungssystems (804b) durch eine Übertragungsmatrix, deren Elemente die Übertragungsfunktionen der jeweiligen Anteile enthalten, darstellbar ist.

---

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

---

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

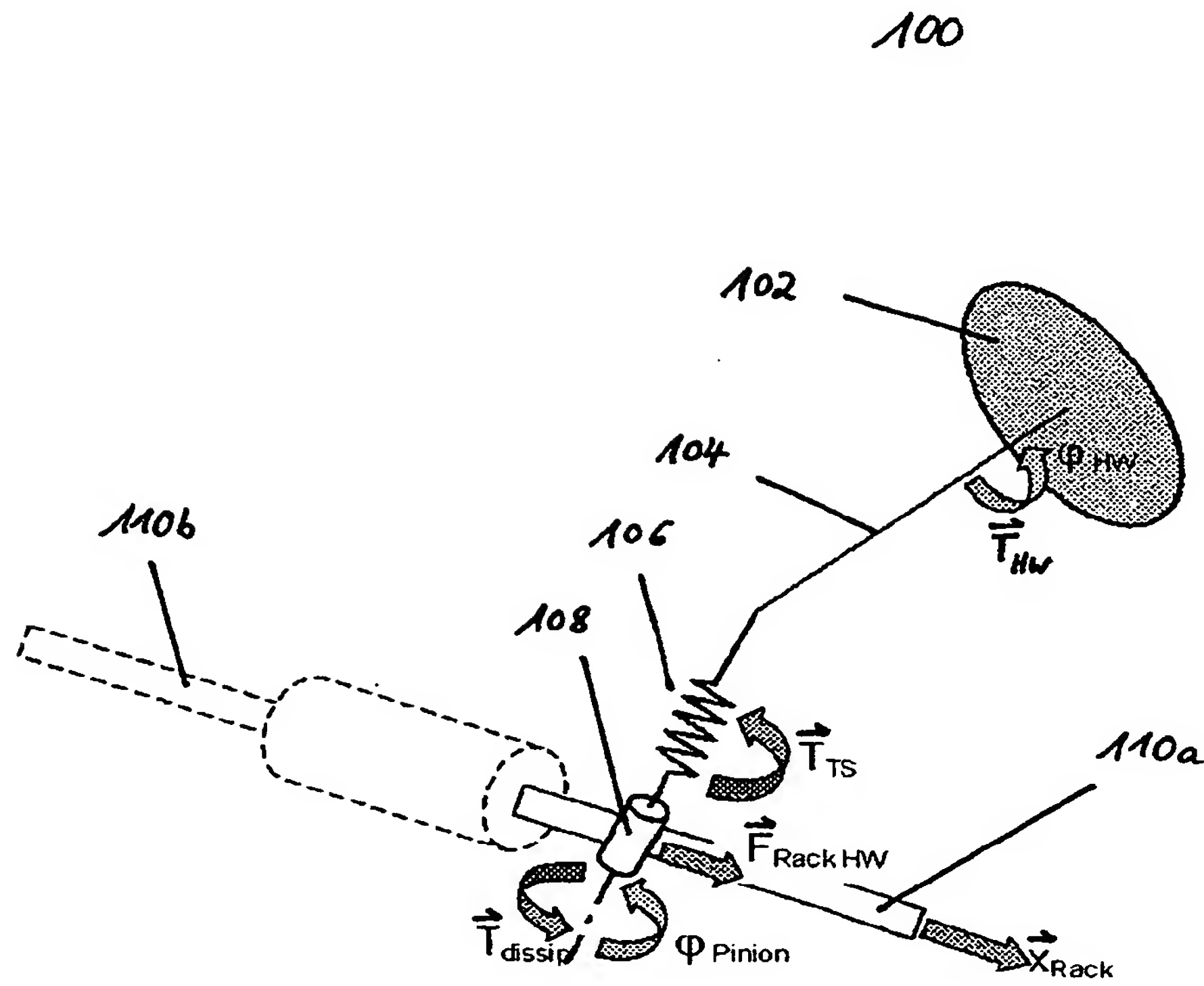


FIG. 1

200

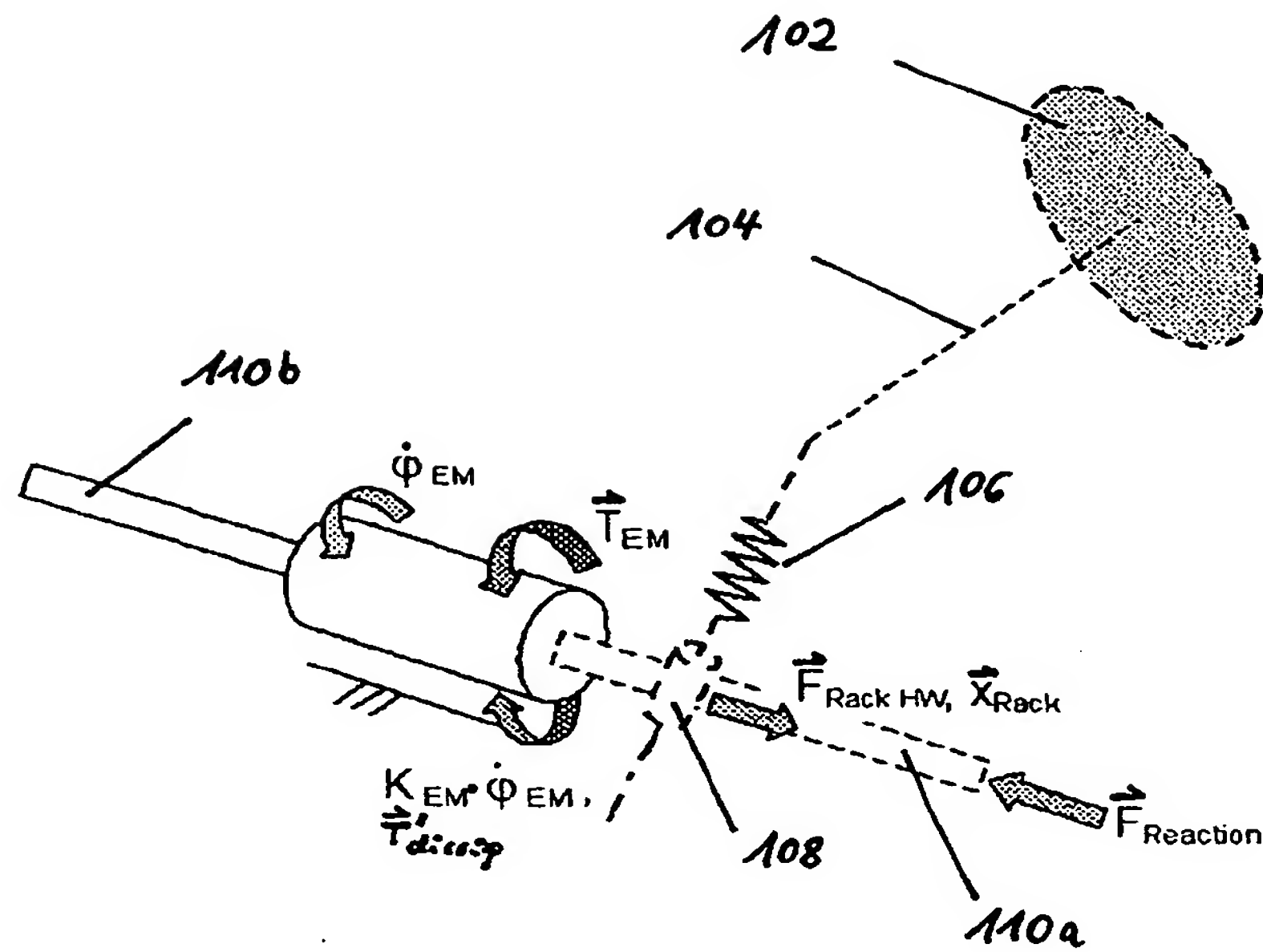


FIG. 2



300

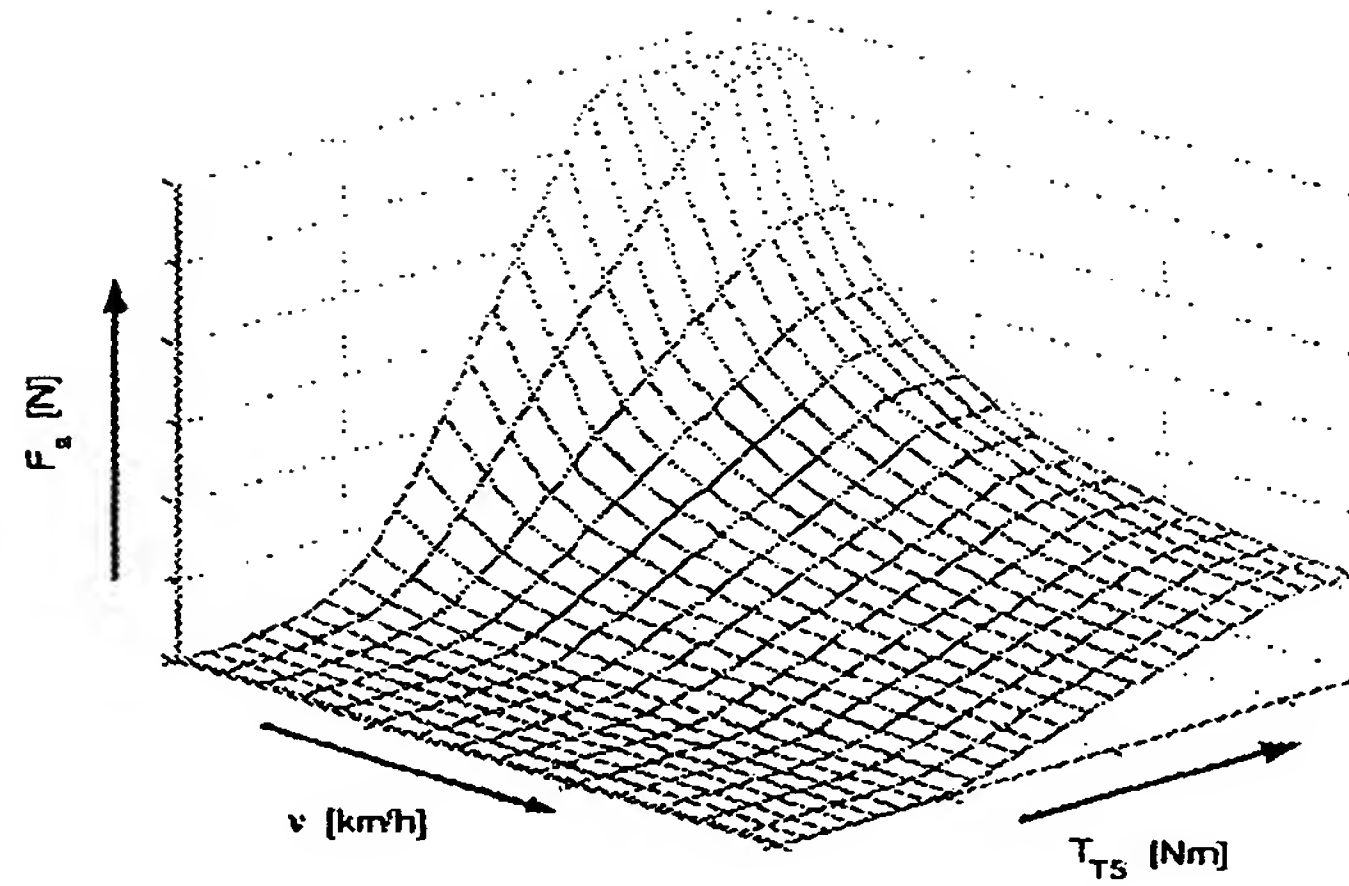


FIG. 3

400

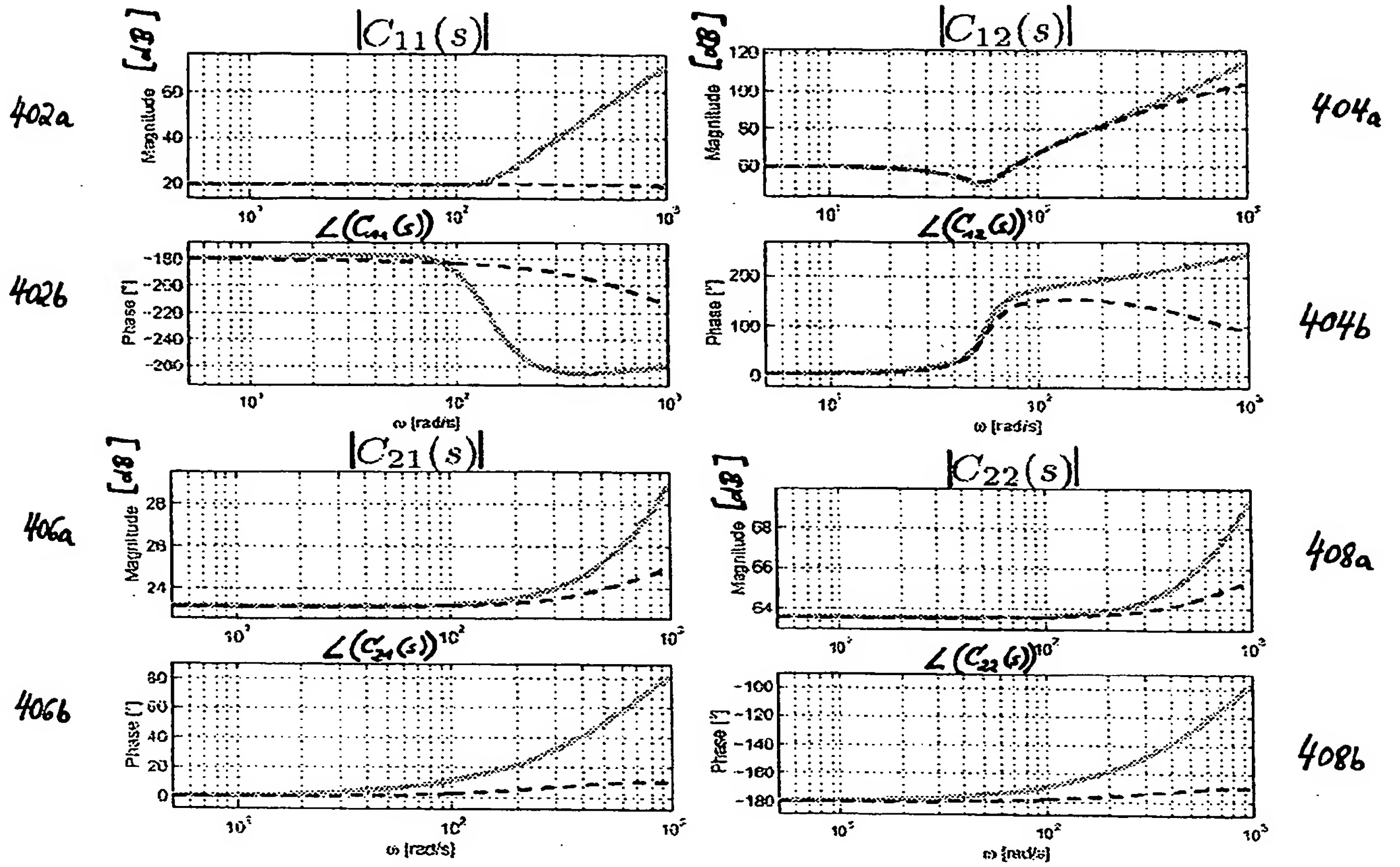


FIG. 4

500

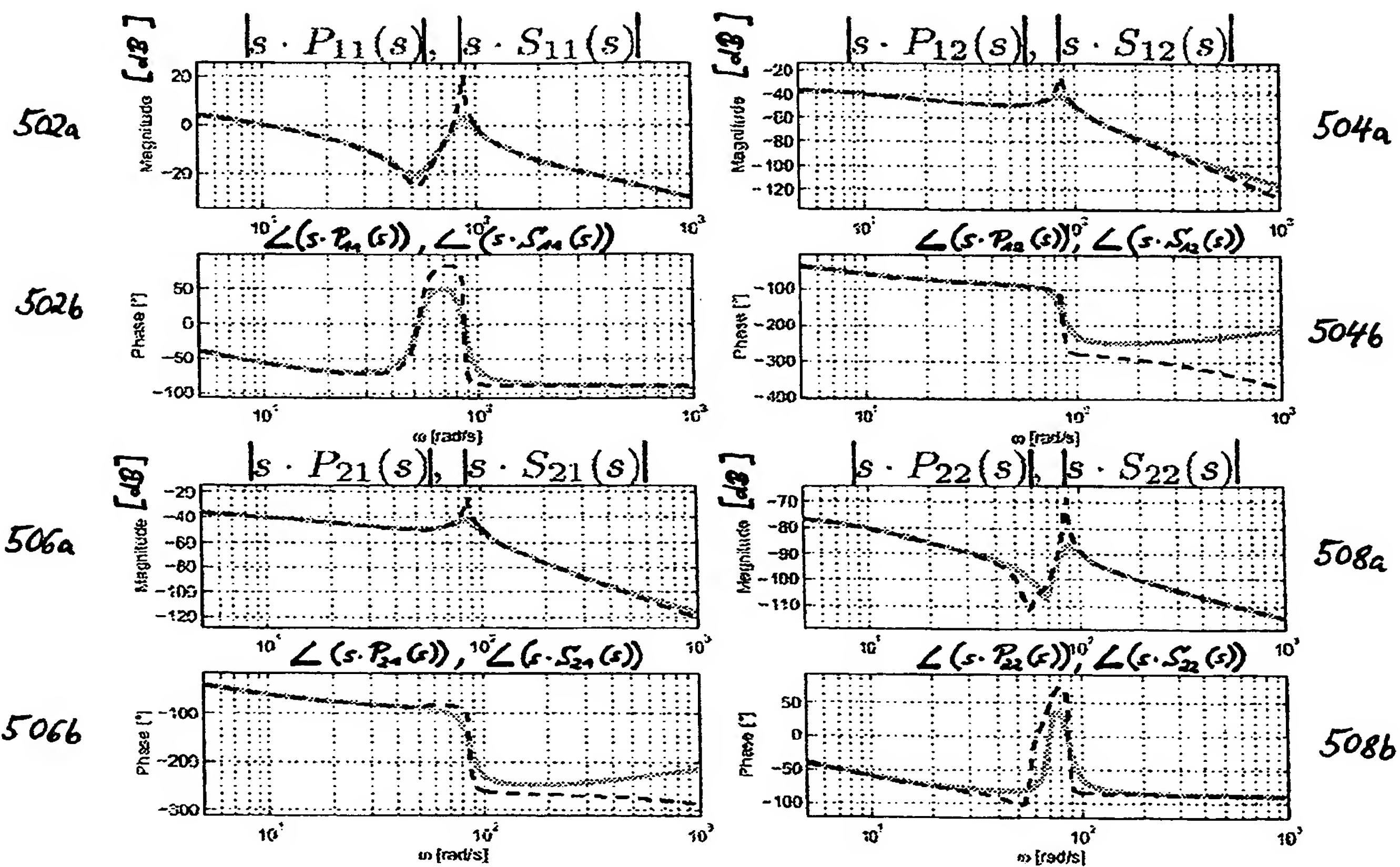


FIG. 5



600

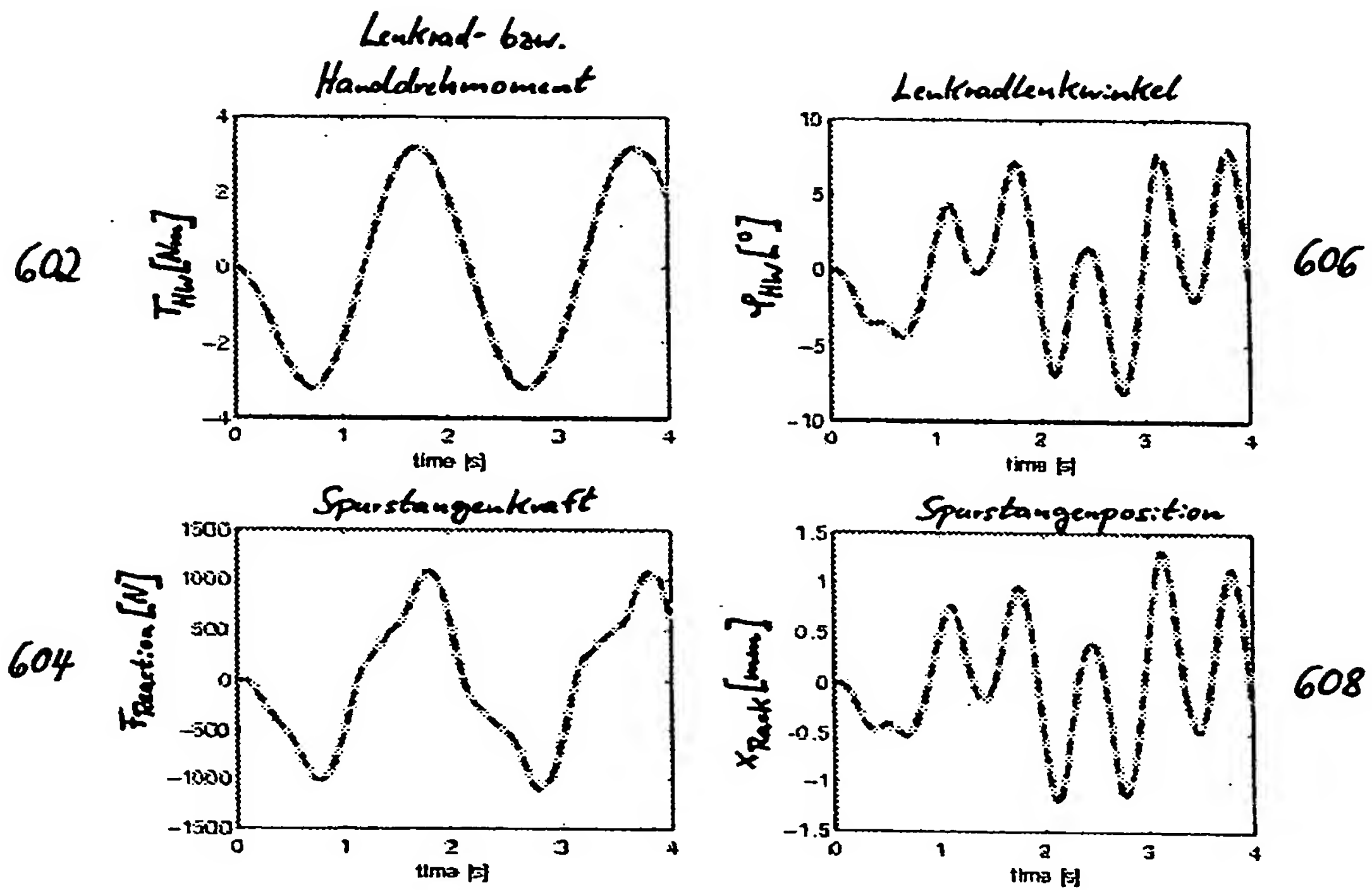


FIG. 6

700

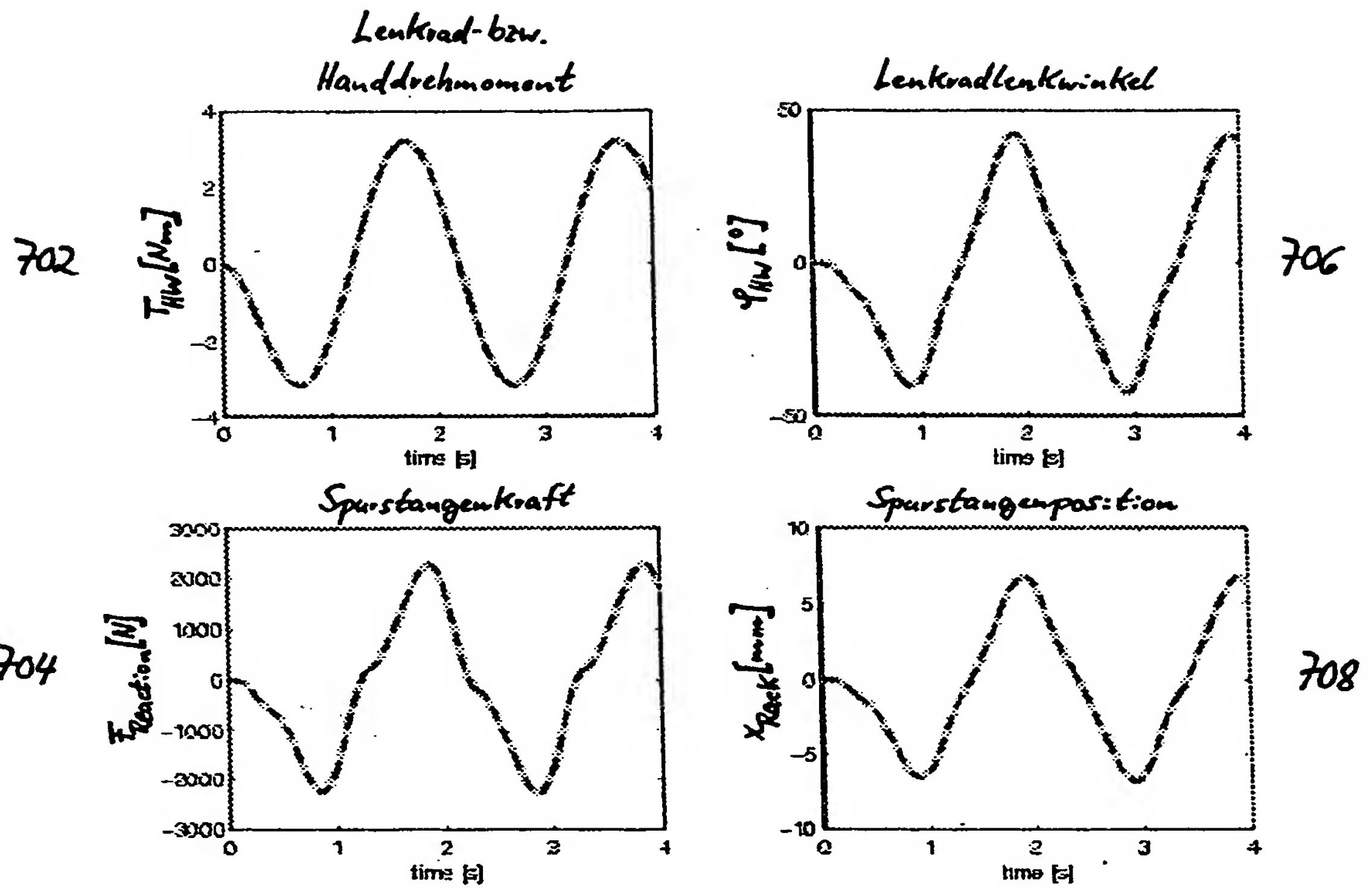


FIG. 7

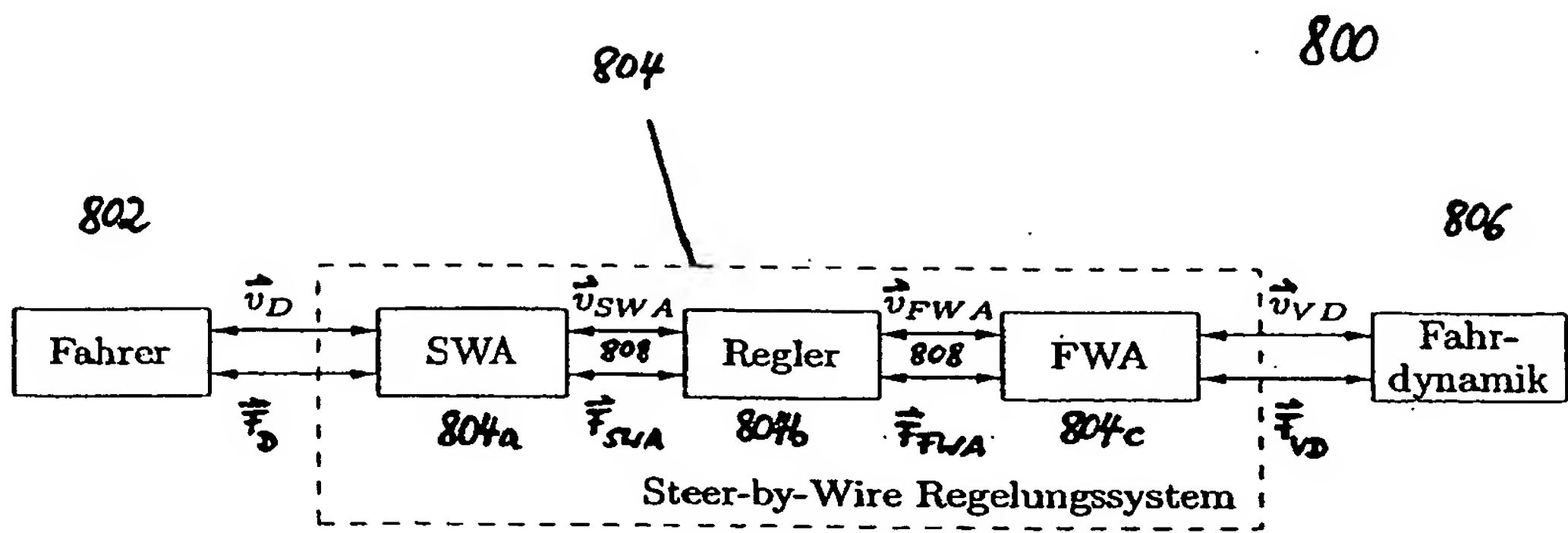


FIG. 8

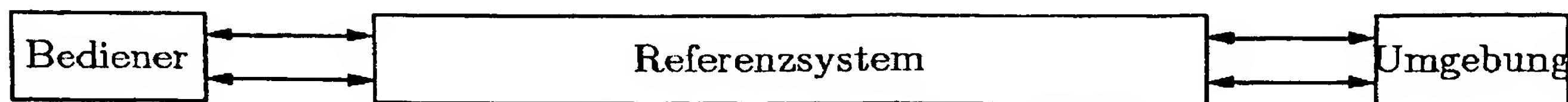


FIG. 9

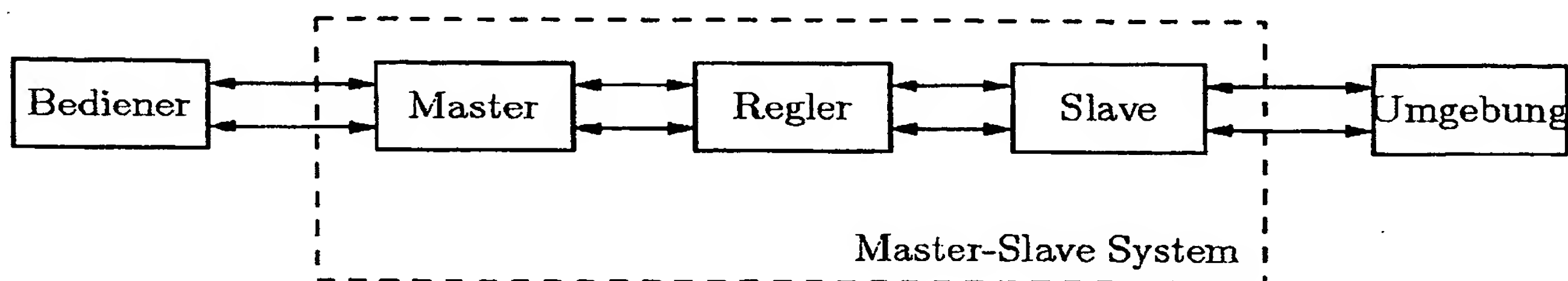


FIG. 10